

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
„КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”**

**ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ ТА СИСТЕМ**

"До захисту допущено"

В.о. завідувач кафедри

(підпис) Юлія ЯМНЕНКО
(ініціали, прізвище)

" ____ " _____ 2020р.

**Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра**

з спеціальністю 171 Електроніка
(код та назва напрямку підготовки або спеціальності)
спеціалізація Електронні прилади та пристрої

на тему: **Електронний генератор з індуктивним накопичувачем
енергії для високовольтних технологій**

Виконав: студент IV курсу, групи ДЕ-62

Воляр Богдан Михайлович

Керівник : д. т. н., проф. кафедри ЕПС Кузьмичев А. І.

(підпис)

Консультант технічний розділ д. т. н., проф. каф. ЕПС Кузьмичев А.І.

(назва розділу)

(вчені ступінь та звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент : к. т. н., доцент кафедри МЕ Татарчук Д.Д.

(підпис)

Консультант

по нормоконтролю к. т. н., доцент кафедри ЕПС Чадюк В.О.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань

Студент _____
(підпис)

Київ – 2020 року

[illegible]

**Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського”**

Факультет електроніки

Кафедра Електронних пристроїв та систем

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність 171 Електроніка

Спеціалізація Електронні прилади та пристрої

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувач кафедри

(підпис) Юлія ЯМНЕНКО
(прізвище ініціали)

« ____ » _____ 2020 року

**З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ СТУДЕНТУ**

Воляру Богдану Михайловичу

1. Тема проєкту: Електронний генератор з індуктивним накопичувачем енергії для високовольтних технологій

Керівник проєкту: д. т. н., проф. кафедри ЕПС Кузьмичев А. І.,
затверджені наказом по університету від 25 травня 2020 року № 1196-с.

2. Термін подання студентом проєкту: 9 червня 2020 р.

3. Вихідні дані до проєкту: електронний генератор будується на основі приладу тасітронного типу, напруга живлення – 1 кВ, від вихідної напруги – імпульсний (тривалість імпульсів 1-2 мкс) та слабо-пульсуючий уніполярний, вихідна напруга – 10 кВ, опір активного навантаження – 0,5-8 кОм.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити):
Вступ, Аналіз електронних ключів тасітронного типу, Побудова і аналіз схеми тасітронного генератора високої напруги, Моделювання генерації імпульсів високої напруги, Розробка двоімпульсної схеми керування для тасітронного генератора, Висновки, Реферат

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): креслення тасітрону, креслення схеми запуску (керування) для тасітрону, плакати для демонстрації результатів роботи

6. Консультанти розділів

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|-----------|---|----------------|------------------|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| Технічний | д. т. н., проф. кафедри ЕПС Кузьмичев А. І. | | |
| | | | |
| | | | |

7. Дата видачі завдання 15 жовтня 2019 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів виконання Дипломної роботи | Строки виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|---|-----------------------------------|----------|
| 1 | Огляд існуючих рішень у даній галузі, обґрунтування необхідності розробки, робота з літературою | Листопад 2019 | |
| 2 | Ознайомлення з характеристиками ключових приладів тасітронного типу, робота з літературою | Листопад 2019 | |
| 3 | Побудова структури тасітронного генератору високої напруги | Грудень 2019 | |
| 5 | Розрахунок та вибір параметрів та елементів схеми електричної принципової для запуску тасітрону | Лютий 2020 | |
| 6 | Моделювання тасітронного генератора і розробка програмного забезпечення | Березень 2020 | |
| 7 | Оформлення роботи та графічного матеріалу | Квітень -травень 2020 | |
| 8 | Прийняття до захисту | 10 червня 2020 | |
| 9 | Підготовка тексту доповіді до захисту | 15 червня 2020 | |
| 10 | Захист | 16 червня 2020 | |

Студент

(підпис)

Б.М. Воляр

Керівник проекту

(підпис)

А.І. Кузьмичев

Анотація

Розглянуті особливості генерації високої напруги в імпульсній або слабопульсуючій формі для різних застосувань з використанням індуктивного накопичувача енергії. Висока напруга (десятки кіловольт) генерується за рахунок самоіндукції при вимкненні накопичувача від низьковольтного джерела струму накачки (напругою менше 1 кВ) за допомогою високовольтного приладу-комутатора тасітроного типу. Тасітрон є газорозрядним тріодом з густою керуючою сіткою, яка забезпечує ініціювання розряду між катодом і анодом при додатній напрузі для накачки струмом накопичувача, а потім його вимкнення від джерела струму при подачі на сітку негативної напруги 20–200 В завдяки запиранню електронного потоку на анод. Тасітрони здатні включати струми від одиниць до сотень ампер при наявності високої напруги між катодом і анодом за час порядку 1 мкс. Розглянуті діаграми зміни в часі струму і напруги на тасітроні і навантаження при генерації як імпульсної, так і слабопульсуючої напруги. В останньому випадку паралельно навантаженню включається накопичувальний (фільтровий) конденсатор, що живить навантаження в періоди накачки індуктивного накопичувача, а для динамічного розділення ланцюгу накопичувального конденсатора і тасітрона запропоновано використовувати швидкодіючий імпульсний газотрон. Наведені формули та розраховані графіки, що дозволяють оцінювати параметри процесу генерації напруги. Запропоновано застосовувати комбінований прилад-комутатор, що містить в одному корпусі тасітрон і газотрон з загальним катодним електродом для спрощення схеми генератору високої напруги.

Ключові слова: висока напруга, імпульсна напруга, тасітрон, індуктивний накопичувач енергії, імпульсний газотрон

Annotation

Features of generating high voltage in a pulsed or weakly pulsating form for different applications with an inductive energy storage device are considered. High voltage (tens of kilovolts) is generated due to self-induction when the storage is disconnected using a high-voltage tacitron-type switch device from a low-voltage pumping current source (with voltage less than 1 kV). The tacitron is a gas-discharge triode with a dense control grid, which provides initiation of a discharge between the cathode and anode and pumping the storage at a positive voltage, and then disconnecting it from the pumping current source, when a negative voltage of 20-200 V is applied to the grid for the blocking of the electron flow to the anode. Tacitrons are able to turn-off currents from a few to hundreds of amperes in the presence of a high voltage between the cathode and anode that takes a time of the order of 1 μ s. Diagrams of changes in time of the current and voltage of the tacitron and the load during the generation of both pulsed and weakly pulsating voltages are considered. In the latter case, an additional storage (filter) capacitor is connected in parallel with the load, supplying the load by energy during the pumping periods of the inductive storage, and a high-speed pulse gas-filled rectifier diode is proposed to use for the dynamic separation of the storage capacitor and tacitron circuits in the said periods. Formulas are given that allow one to evaluate the parameters of the high voltage generation process. It is proposed to use a combined switching device containing tacitron and pulse gas-filled diode in one envelope with a common cathode electrode to simplify the high voltage generator circuit.

Keywords: high voltage, pulse voltage, tacitron, inductive energy storage, pulse gas-filled rectifier diode

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ВСТУП..... | 6 |
| 1. ЕЛЕКТРОННІ КЛЮЧІ ТАСІТРОННОГО ТИПА..... | 9 |
| 1.1. Принцип дії тасітронів..... | 9 |
| 1.2. Параметри та характеристики промислових тасітронів..... | 14 |
| 1.3. Типова конструкція промислового тасітрону тріодного типу..... | 14 |
| 2. ПОБУДОВА І АНАЛІЗ СХЕМИ ТАСІТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ВИСОКОЇ НАПРУГИ..... | 16 |
| 2.1. Аналіз і вибір базових варіантів побудови схеми тасітронного генератора високої напруги..... | 16 |
| 2.2. Аналіз стадії накачування ІНЕ..... | 18 |
| 2.3. Аналіз генерації імпульсів високої напруги на паралельному навантаженні..... | 18 |
| 2.4. Аналіз генерації високої напруги на навантаженні з паралельним конденсатором..... | 20 |
| 2.5. Розробка пропозиції по створенню нового тасітрона гібридної конструкції для генерації високої напруги на навантаженні з паралельним конденсатором..... | 22 |
| 3. МОДЕЛЮВАННЯ ГЕНЕРАЦІЇ ІМПУЛЬСІВ ВИСОКОЇ НАПРУГИ..... | 24 |
| 4. РОЗРОБКА ДВОІМПУЛЬСНОЇ СХЕМИ КЕРУВАННЯ ДЛЯ ТАСІТРОННОГО ГЕНЕРАТОРУ..... | 43 |
| ВИСНОВКИ..... | 47 |
| СПИСОК ПОСИЛАНЬ..... | 49 |
| ДОДАТОК А. Лістинг програми | |
| ДОДАТОК Б. Схема електрична принципова | |
| ДОДАТОК В. Конструкція тасітрона ТГУ1 - 27/7 | |

| | | | | | | | | |
|-----------|----------------|----------|--------|------|---|---|------|--------|
| | | | | | <i>ДП. ДЕ62. 01. 000 ПЗ</i> | | | |
| Змн. | Арк.р | № докум. | Підпис | Дата | | | | |
| Розроб. | Воляр Б. М. | | | | Електронний генератор з індуктивним накопичувачем енергії для високовольтих технологій | Літ. | Арк. | Аркшів |
| Перевір. | Кузьмичев А. І | | | | | | 3 | 49 |
| Реценз. | | | | | | «КПІ ім. Ігоря Сікорського», ФЕЛ, ЕПС, гр. ДЕ-62 | | |
| Н. Контр. | Чадюк В. О. | | | | | | | |
| Затверд. | Ямнеко Ю. С | | | | | | | |

ДОДАТОК Г. Перелік елементів (Схема електрична принципова)

ДОДАТОК Д. Перелік елементів (Конструкція тасітрона ТГУ1 - 27/7)

ДОДАТОК Є. Summary

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|----------------------|-----|
| | | | | | ДП. ДЕ62. 01. 000 ПЗ | Арк |
| | | | | | | |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 4 |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

ІНЕ – індуктивний накопичувач енергії;

ЕВК – електровакуумний комутатор;

ГРК – газорозрядний комутатор;

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|----------------------|------|
| | | | | | ДП. ДЕ62. 01. 000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 5 |

ВСТУП

Багато електрофізичних, в тому числі плазмових, електрохімічних та електротехнологічних процесів, а також деяких медичних процедур, засновані на використанні високої електричної напруги (U) [1-7]. Напруга може бути постійною, змінною або імпульсною [1-7]. Величина U залежить від застосування і може становити від одиниць до сотень кіловольт. Широкий діапазон застосувань високої напруги вимагає наявності генераторів для широких діапазонів потужностей (P) і часових параметрів (тривалості імпульсів τ і періодів їх повторення $T = 1 / F$, де F - частота проходження імпульсів). На практиці потрібні імпульсні потужності P від 10 Вт до 1 ГВт при середній за період величині $P_{\text{ср}}$ від ват до сотень кіловат. Такі ж величини $P_{\text{ср}}$ можуть вимагатися при роботі навантаження на постійному струмі (ПС). Тривалість імпульсів може становити від часток наносекунд до режиму ПС. Оскільки один тип генератора не може забезпечити отримання високої напруги у всьому діапазоні можливих параметрів, використовуються різні методи генерації. У разі щодо малих потужностей (одиниці-десятки ватт) постійну U отримують або від батареї гальванічних елементів, або за рахунок каскадного включення накопичувальних конденсаторів в схемах діод-конденсаторних помножувачів напруги. У разі великих потужностей використовують підвищувальні трансформатори і випрямлячі з ємнісним фільтром, що слугує накопичувачем енергії. Імпульсну високу напругу найчастіше отримують за рахунок розрядки накопичувального конденсатора на навантаження через підвищувальний трансформатор за допомогою імпульсного ключового приладу або за рахунок каскадного включення накопичувальних конденсаторів, як в генераторі Маркса [1,2,4,5]. Також відомий безтрансформаторний спосіб генерації високої напруги за допомогою індуктивного накопичувача енергії (ІНЕ), який заснований на явищі генерації напруги самоіндукції (U_L) при виключенні струму: $U_L = -(di_L/dt)$, де L -

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|----------------------|-----|
| | | | | | ДП. ДЕ62. 01. 000 ПЗ | Арк |
| | | | | | | 6 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

індуктивність накопичувача, di_L/dt – швидкість зниження струму [1,2,4,5,8-15]. При швидкому відключенні струму величина U_L може досягати значень, набагато переважаючих напругу первинного джерела для накачування накопичувача струмом, тобто ІНЕ може виконувати функції трансформатора напруги, але при цьому струм навантаження не буде більше i_L . Як правило, генератори високої напруги на основі ІНЕ простіше інших схем, тому такий підхід використовується в багатьох схемах безтрансформаторного живлення. Особливістю генераторів з ІНЕ є необхідність застосування ключового приладу (S), який здатний не тільки включати струм накачування ІНЕ, але і вимикати його, і чим швидше, тим краще. При цьому прилад в вимкненому стані повинен витримувати без пробую високу напругу U_L .

На сьогодні є ряд електронних приладів, здатних багаторазово і в частотному режимі вимикати струм при наявності напруги на електродах. До таких приладів відносяться транзистори, замикаючі (двухопераційні) тиристори, електровакуумні комутатори (ЕВК) із замиканням електронного потоку і деякі типи газорозрядних (плазмових) комутаторів (ГРК) [1,2,4,5,8-23]. Найбільшого поширення набули транзистори, головним чином, в системах високоефективного безтрансформаторного живлення радіоелектронної апаратури, але величина допустимої напруги у них не перевищує декількох кіловольт. Це також відноситься до вимикаючих тиристорів. Високовольтними є реверсивні диністори, але вони працюють у наносекундному діапазоні. ЕВК вельми ефективні по швидкості вимикання і допустимій напрузі, але вони громіздкі і у них великі втрати потужності на підігрів катода і транспортування електронного потоку через вакуумні проміжки в період провідності. ГРК мають менші втрати в цей період завдяки компенсації електронного просторового заряду позитивним зарядом плазмових іонів. Однак переривання газового розряду при наявності напруги на електродах дуже проблематично. Як відомо, така ж проблема має місце в приладах тиристорного типу, процеси в яких багато в чому аналогічні процесам в ГРК.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|----------------------|------|
| | | | | | ДП. ДЕ62. 01. 000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 7 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

Запропоновано різні підходи до керованого вимикання ГРК, один з перспективних заснований на сітковому керуванні, який схожий на сіткове керування в ЕВК [23]. ГРК з сітковим керуванням був названий тасітрон. Сучасні тасітрони дозволяють вимикати струм до 1 кА при напрузі до 25 кВ і більше. Їх основне призначення – працювати спільно з ємнісними накопичувачами енергії, але цікавим є їх застосування і для генерації високої напруги спільно з ІНЕ без використання підвищувальних трансформаторів. Таке застосування тасітрону, як показали автори, вельми затребуване, але воно досліджено недостатньо. Його розвиток дозволив б розширити область використання цих ГКП, сприяв б збільшенню їх промислового випуску, і розробці нових конструкцій. Мета даної роботи розглянути особливості генерації тасітрону високої напруги, розробити електричну модель і представити варіанти модернізації їх конструкції з урахуванням спільної роботи з ІНЕ.

| | | | | | | |
|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|-----------------------------|------|
| | | | | | <i>ДП. ДЕ62. 01. 000 ПЗ</i> | Арк. |
| | | | | | | 8 |
| <i>Змн.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> | | |

1. ЕЛЕКТРОННІ КЛЮЧІ ТАСІТРОННОГО ТИПА

1.1. Принцип дії тасітронів

Існує безліч електронних ключових приладів: транзистори, електронні лампи, тиратрони, ігнітрони, тасітрони з термоелектронним і холодним катодами, як закордонний варіант – з холодним катодом і схрещеними полями кроссатрон [1.2.4,5,16-25]. Для генерації високої напруги з використання ІНЕ щонайкраще підходять електронні ключі, які здатні вимикати струм в умовах дії високої напруги на фізичні процеси у ключах. Такими ключами є тасітрони, електронні вакуумні лампи та деякі інші прилади. Тасітрони більш ефективні ніж вакуумні лампи завдяки менший робочий напрузі у період комутації струму (20-100 В проти кіловольтів у ламп). Позитивні якості тасітронів в порівнянні з не є тільки суттєво більший ККД, але і кращі габаритно-масові параметри. Однак тасітрони є відносні мало відомими приладами, і є потреба у їх більш детальних дослідження для розширення їх застосування в електронній техніці.

Тасітрон є приладом, який можна розглядати так модифікацію другого більш відомого газорозрядного приладу – водневого тиратрона [1,2,4,5,23-25]. Останній є тріодом з проміжним електродам-сіткою між катодом і анодом. Він наповнений воднем, який слугує робочим плазмоутворюючим газом. Тиратрон вмикає струм після ініціювання у ньому газового розряду за допомогою сітки: тобто з початку створюється плазмовий розряд між катодом і сіткою, а потім електрони з цього розряду утворюють плазму біля аноду і створюється плазмовий канал між катодом і анодом. В результаті тиратрон починає комутувати струм.

Пошук шляхів до можливості за допомогою сітки не тільки управляти моментом запалювання розряду між катодом і анодом, але й переривати розряд привели до створення приладу нового типу, названого тасітроном. Тасітрон також являє собою трьохелектродний прилад, наповнений воднем [23]. Керуючий електрод виконаний у вигляді мілкоструктурної сітки, що повністю перекриває розрядний проміжок між анодом і катодом. Катод

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|----------------------|-----|
| | | | | | ДП. ДЕ62. 01. 000 ПЗ | Арк |
| | | | | | | 9 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

тасітрона – термоелектронний або холодний з вторинною іонно-електронною емісією. Для підтримки в приладі постійного тиску водню служить водневий генератор з гідриду титану [25].

Таким чином, тасітрон володіє унікальною для потужних газорозрядних приладів здатністю – за допомогою сітки перериває струм анода без зняття анодної напруги, чим він подібний вакуумним електронним лампам. З іншого боку, тасітрон має головну перевагу газорозрядних приладів – має високий ККД по анодному ланцюзі й по ряду властивостей, як було зазначено, може розглядатися як тиратрон, що має особливу мілкоструктурну конструкцію сітки. Мілкоструктурність конструкції означає малий діаметр отворів у ній для проходу електронів до аноду. При робочих умовах, характерних для тиратронів: тиску водню 20-80 Па і густини струму через отвір 5-50 А/мм², товщина іонного шару поблизу сітки l мала в порівнянні з розміром отворів в сітці $D = 3-4$ мм. Це призводить до екранування поля керуючого електроду і втраті можливості керування по сітці. В тасітронах, за рахунок меншого тиску робочого газу (1,5-30 Па) і менших розмірів комірок сітки $D < 0,5$ мм, вже в стадії провідності l порівняно з D . При подачі негативного потенціалу на сітку l збільшується, що призводить до повного перекриття отвору шаром просторового заряду іонів і запиранню електронного струму на анод. Фактично сітка, що раніше знаходилась під плаваючим потенціалом, починає відігравати роль катода по відношенню до розряду в камері запуску, а сама катодна камера (камера запуску) перестає постачати електронний потік в основний зазор. Це призводить до гасіння розряду в основному зазорі (анодно-сітковому проміжку). Струм сітки, необхідний для вимкнення тасітрона може складати 80-100 % від анодного струму.

Слід відмітити, що після запуску тасітрону та утворення плазмового каналу катод-анод сітка екранується шаром іонів і веде себе нейтрально, як сітка у тиратронах, але через малий діаметр отворів вона сильно гріється. Тому конструкція сітки повинна добре розсіювати тепло. Для зменшення струму на сітку при проходженні струму на анод у сітковий ланцюг вводять

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|----------------------|------|
| | | | | | ДП. ДЕ62. 01. 000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 10 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

резистор. Але цей резистор гальмує наростання негативної напруги на сітці у період гасіння розряду на анод. Для збільшення швидкості запирання струму електронів на анод і розсіювання плазми в приладі необхідно швидко відновлення негативної напруги на сітці в момент гасіння розряду. Тому величина опору в сітковому ланцюзі обирається не більше 100 Ом. Всі ці міри дають можливість вимикати струм через тасітрон негативною напругою 150-200 В. Оптимальним варіантом є шунтування цього резистору у період гасіння розряду на анод за допомогою підходящого електронного приладу (тиратрона, транзистора чи тиристора). Була запропонована схема двоімпульсного керування, варіант якої приведений на рис. 1.1 Анодне джерело напруги E_0 і тасітрон V_3 під'єднані до навантаження R_5 за схемою модулятора з частковим розрядом накопичувача енергії (ємності C_1). Резистори R_1 і R_2 – для заряду C_1 . Резистор R_4 – для вимірювання струму. Схема працює наступним чином.

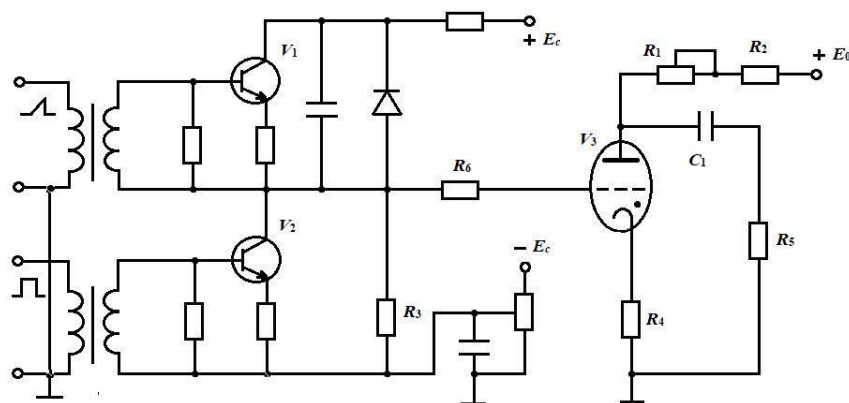


Рис. 1.1. Схема двоімпульсного керування тасітроном

До запуску тасітрона на його сітку від джерела $-E_c$ через резистор R_3 з великим опором подається негативна напруга, а ємність C_1 заряджена до напруги $+E_0$. Для запуску тасітрона і переривання розряду використовуються два транзисторних ключа V_1 і V_2 . При відпиранні ключа V_1 напруга від джерела $+E_c$ подається на сітку через низькоомний резистор R_6 , що призводить до виникнення розряду між катодом і сіткою і потім виникненню розряду на анод. Закінчення імпульсу запуску V_1 призводить фактично до відключення сітки від джерел і переходу її в режим з плаваючим

потенціалом. Падіння напруги на резисторі R_3 з великим опором практично дорівнює напрузі джерела $-E_c$. Такий стан не впливає на проходження струму в тасітроні, і він продовжує проводити струм, величина якого визначається напругою E_0 , опором навантаження R_5 і падінням анодної напруги на тасітроні. Оскільки остання набагато менша, чим E_0 , ККД схемі дуже великий.

Коли відкривається транзистор V_2 , резистор R_3 шунтується транзистором і на сітку тасітрона поступає напруга від джерела зміщення від джерела $-E_c$ через низькоомний ланцюг. В зв'язку з цим настає швидке перекриття іонними оболонками плазмового каналу в області сітки, і струм на анод припиняється. Час надходження V_2 і відкритому стані повинен бути достатнім для повного запирання тасітрона. В протилежному випадку розряд на тасітроні відновиться.

Схема двохімпульсного керування в тасітроні має ряд плюсів, зокрема у наступному. Коли в тасітроні протікає струм на анод, струм на сітку рівний нулю і сітка не підлягає під інтенсивне іонне бомбардування. Протяжність імпульсу анодного струму у навантаженні R_5 легко регулюється шляхом зміни часу затримки імпульсу гасіння на транзистор V_2 . Імпульси керування мають малу протяжність, і при великій протяжності імпульсу анодного струму до них не пред'являються жорсткі вимоги.

На рис. 1.2 наведені типові часові характеристики процесів ввімкнення (розвитку розряду) та вимкнення (гасіння розряду) одного з дослідних зразків тасітрону. Як видно ці процеси мають мікросекундну тривалість.

Величина падіння напруги на тасітроні в період комутації струму, як й в інших газорозрядних приладах з підігрівним оксидним катодом [24], буде визначатися, головним чином, температурою катода (напругою розжарення катода), тиском газу (напругою розжарення водневого генератора) і амплітудою імпульсу струму анода. Можна вважати, що на величину падіння напруги в тасітроні буде впливати також і сітка. У процесі проведення експериментів було встановлено, що при середньому струмі 0.4-0.5 А та більше падіння напруги в тасітроні так само, як й в імпульсних тиратронах,

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|----------------------|-----|
| | | | | | ДП. ДЕ62. 01. 000 ПЗ | Арк |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 12 |

мало залежить від амплітуди струму анода й напруги розжарення катода та генератора водню (у припустимих межах зміни напруги).

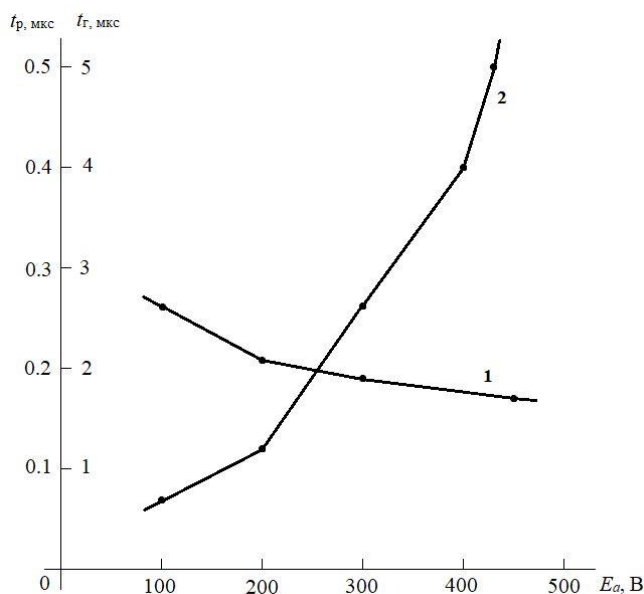


Рис. 1.2. Типові часові характеристики тасітрону (1 – тривалість розвитку розряду t_p або ввімкнення тасітрону, 2 – тривалість гасіння розряду t_f або вимкнення тасітрону) при різній напрузі джерел живлення аноду.

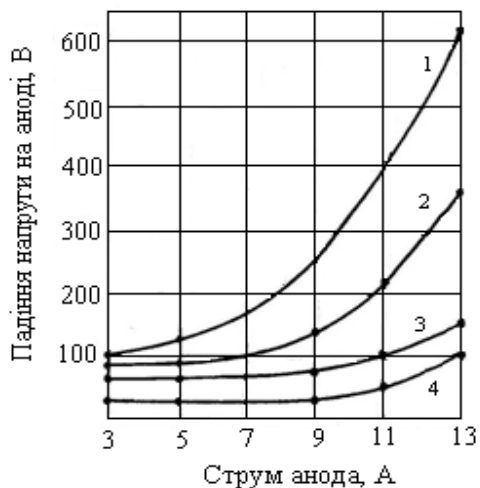


Рис. 1.3. Типові вольт-амперні характеристики тасітрона при різній напрузі підігрівника термокатоду: 1 – 6.0 В; 2 – 6.3 В; 3 – 6.6 В; 4 – 6.9 В.

Як правило, величина падіння напруги на тасітроні не перевищує 200 В. При малих значеннях напруги підігрівника термокатоду і середнього струму спостерігається різкий загин вольт-амперних характеристик вгору й сильна їх залежність від напруги розжарення катода (рис. 1.3), що обумовлено недогрівом катода.

1.2. Параметри та характеристики промислових тасітронів

Електронна промисловість випускає ряд тасітронів для використання у різних радіоелектронній апаратурі. В табл. 1.1 наведені дані для найбільш відомих типів тасітронів з термокатодом (ТГУ) та с холодним катодом (ТХУ) [23]. Ці тасітрони мають металокерамічну оболонку. Як бачимо, промисловість випускає досить широкий спектр тасітронів для різного призначення.

Таблиця 1.1 – Параметри тасітронів

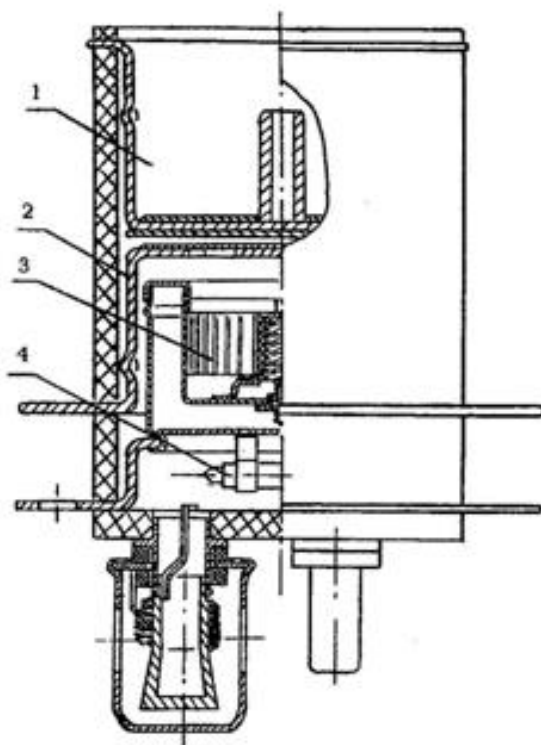
| Параметр | ТГУ1-27/7 | ТГУ1-5/12 | ТГУ2-1000/25 | ТХУ-0.2k/25 |
|---|-----------|-----------|--------------|-------------|
| U_a , кВ | 7 | 5 | 25 | 25 |
| I_p , А | 27 | 5*** | 1000 | 200 |
| I_a , А | 0.2 | 1.3 | 2 | 1 |
| τ , мкс | 0.1-100 | 0.1-100 | 0.1-100 | 0.1-1000 |
| F , кГц | 30 | 300 | 100 | 15 |
| ΔU^* , В | 100 | 100 | 100 | 1000 |
| P^{**}_h , Вт | 190 | 180 | 200 | 16 |
| Розміри, мм | Ø95×122 | Ø65×168 | Ø130×205 | Ø150×150 |
| U_a – максимальна напруга на аноді, I_p – максимальний струм розряду на анод, I_a – максимальний середній струм аноду, τ – тривалість імпульсу анодного струму, F – максимальна частота повторення імпульсів, $^*\Delta U$ – падіння напруги на розряді на анод, $^{**}P_h$ – загальна потужність розжарення термокатоду, $^{***}I_p$ – може досягати до 100 А. | | | | |

1.3. Типова конструкція промислового тасітрону тріодного типу

Конструкція одного з тасітронів (ТГУ1-27/7) зображена на рисунку 1.4.

Він має термокатод посереднього розжарювання, тобто за допомогою

окремого підігрівника, гідрид-титановий генератор водню одну керувальну сітку. Термокатод має тепловий екран для зниження розходу енергії на підігрів. Анод, сітка і термокатод закріплені на мідних чашовидних електродах, припаяних к керамічним циліндричним ізоляторам. На нижній керамічній дисковій пластині закріплені електричні вводи до підігрівника термокатоде і генератору водню Мідні електроди і керамічні ізолятори складають герметичну оболонку приладу. Послідовно з підігрівником генератора водню включений резистор-компенсатор для стабілізації теплового режиму генератора й тиску водню в приладі. Зазвичай тасітрон має примусове повітряне охолодження.



1 - вузол анода, 2 - вузол сітки, 3 - катодно-підігрівальний вузол,
4 - генератор водню.

Рис. 1.4. Конструкція тасітрона ТГУ1-27/7.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|----------------------|-----|
| | | | | | ДП. ДЕ62. 01. 000 ПЗ | Арк |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 15 |

2. ПОБУДОВА І АНАЛІЗ СХЕМИ ТАСІТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ВИСОКОЇ НАПРУГИ

2.1. Аналіз і вибір базових варіантів побудови схеми тасітронного генератора високої напруги

З усього різноманіття можливих схем побудови тасітронного генератора високої напруги можна виділити два базових варіанти, які представлені на рис. 2.1. Один призначений генерувати коротко-імпульсну напругу, а другий – слабо пульсуючу майже постійну напругу. У першому варіанті навантаження R_n' підключається зліва до тасітрону S , а в другому варіанті навантаження R_n'' підключається паралельно до конденсаторного накопичувача енергії або фільтру C_Φ і разом з останнім з'єднана з ІНЕ (L) і тасітроном S через діод блокуючий D . На рис. 2.2 представлена часова діаграма роботи генератора за першим варіантом.

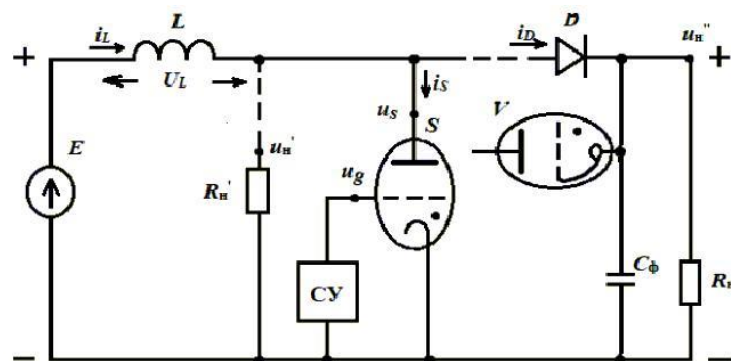


Рис. 2.1. Схема генератора високої напруги. Штриховою лінією показані варіанти включення навантаження (R_n' або R_n''). C_Φ – конденсаторний фільтр, D – блокуючий діод, E – джерело живлення, L – ІНЕ, S – тасітрон, V – блокуючий газотрон, CY – система управління тасітроном

В обох варіантах включення навантаження тасітрону S використовується для накачування струмом ІНЕ (L) і працює в імпульсному режимі, перебуваючи в провідному стані в період з моменту подачі позитивної напруги на сітку t_0 до моменту t_3 закінчення післярозрядного деіонізаційного процесу відновлення електричної міцності анодного проміжку тасітрону. Електрична міцність

визначається максимальною анодною напругою, яка витримує тасітрон без мимовільного переходу в провідний стан.

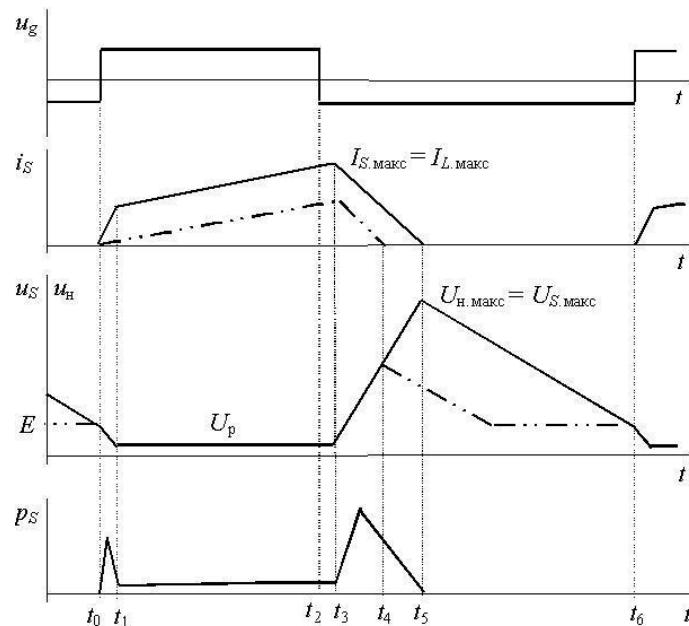


Рис. 2.2. Часова діаграма роботи генератора. Для наочності часовий масштаб подій розтягнутий на стадіях включення і виключення тасітрону.

У період $[t_0, t_1]$ формується розряд між катодом і анодом тасітрону і він переходить в нормальний провідний стан. Час формування розряду – близько 0,1 мкс. У періоди $[t_2, t_3, t_4]$ або t_5 відбувається деіонізація плазми в тасітроні і відновлюється його електрична міцність. Час відновлення – близько 0.5-2 мкс. Причому в період $[t_2, t_3]$ концентрація післярозрядної плазми залишається досить великою, зберігається майже нормальна провідність тасітрону і триває зарядка ІНЕ, потім провідність різко спадає. У зазначені періоди потужність теплового навантаження на тасітрон p_s - максимальна, див. нижню діаграму на рис. 2.2. У період нормальної (тобто максимальної) провідності тасітрону $[t_1, t_3]$ падіння напруги $U_{s.1}$ на ньому близько 50-100 В і слабо залежить від струму. Це дозволяє замінити тасітрони еквівалентним генератором зустрічної напруги $U_{s.1}$ при розрахунку електричного кола під час зарядки ІНЕ. Тривалість позитивної частини керуючого імпульсу на сітку U_g можна скоротити, але до величини не менше часу формування (на практиці - до декількох мікросекунд), і перейти до двухімпульсного управління (короткий відпираючий імпульс і довгий замикаючий). Це знижує

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|----------------------|------|
| | | | | | ДП. ДЕ62. 01. 000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 17 |

теплове навантаження на сітку. Тривалість накачування ІНЕ визначається заданими параметрами схеми і режимом роботи генератора, тасітрони допускають накачування тривалістю десятки-сотні мікросекунд при достатньому охолодженні сітки.

2.2. Аналіз стадії накачування ІНЕ

У період накачування ІНЕ його струм визначається наступною формулою, якщо знехтувати внутрішнім опором джерела, ІНЕ і динамічним опором тасітрону і полягати, що опір навантаження R_n' дуже великий, а його струм дуже малий:

$$i_L = (E - U_{S.1})(t - t_1)/L + i_{0.1}, \quad (2.1)$$

де $i_{0.1}$ – залишковий струм в ІНЕ перед включенням тасітрону. При отриманні даної формули ми використовували відомий закон самоіндукції

$$u_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.2)$$

і, відповідно, $di_L = \frac{1}{L} \int u_L dt$ з наступним інтегруванням.

При роботі схеми в режимі генератора імпульсної напруги з навантаженням R_n' мінімальне значення $i_{0.1} = E/R_n'$ а максимальне визначається ступенем розряду ІНЕ в період $[t_5, t_6]$, коли тасітрон вимкнений. Має місце лінійний заряд ІНЕ. Енергія W накачки ІНЕ:

$$W = 0.5L(i_{L.3})^2, \quad (2.3)$$

де $i_{L.3}$ – струм ІНЕ в момент закінчення періоду накачки t_3 .

2.3. Аналіз генерації імпульсів високої напруги на паралельному навантаженні

Діаграми на рис. 2 також представляють динаміку генерації імпульсу високої напруги в період розрядки ІНЕ з різним запасом енергії. Оскільки тасітрон S і

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|----------------------|-----|
| | | | | | ДП. ДЕ62. 01. 000 ПЗ | Арк |
| | | | | | | 18 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

навантаження R_n' з'єднані паралельно, вони знаходяться під однаковою напругою ($u_s = u_n'$). Після подачі в момент t_2 негативної напруги на сітку тасітрону починається процес деіонізації післярозрядної плазми і виключення струму i_s . Провідність тасітрону починає знижуватися, відповідно, знижується струм i_s і зростає струм через навантаження R_n' , формуючи передній фронт імпульсу напруги. На практиці тривалість фронту становить кілька мікросекунд, на її величину впливає не тільки процес деіонізації післярозрядної плазми в тасітроні, але і паразитні ємності, і втрати енергії в схемі. Поточна величина напруги на навантаженні визначається виразом:

$$u_n' = (i_L - i_s)R_n' \quad (2.4)$$

і досягає максимального значення $U_{n, \max}$ в моменти t_4 або t_5 . Якщо знехтувати втратами енергії в тасітроні в період деіонізації, отримуємо формулу для оцінки амплітуди імпульсу напруги $U_{n, \max} = i_{L,3}R_n' = U_{s, \max}$.

Потім починається експонентний спад напруги на навантаженні і формується задній фронт імпульсу напруги. Цей процес описується рівнянням

$$u_L + Ri_L = L(di_L/dt) + Ri_L = E, \quad (2.5)$$

де R – опір всього ланцюга, включаючи опір навантаження R_n' , активний опір ІНЕ і внутрішній опір джерела первинного живлення. Звідси, якщо знехтувати втратами енергії в тасітроні в період деіонізації, отримуємо формулу для поточної напруги на задньому фронті імпульсу на навантаженні

$$u_n' = E + i_{L,3}R \exp[-R(t-t_3)/L]. \quad (2.6)$$

Суцільними лініями на рис. 2 показані діаграми для випадку, коли ІНЕ в повному обсязі розряджається в період $[t_5, t_6]$, а штрих-пунктирною лінією показані діаграми для випадку, коли ІНЕ повністю розряджається в період $[t_4, t_6]$.

Видно, що неповний розряд ІНЕ дозволяє отримувати більшу амплітуду імпульсів при інших рівних умовах. Такий розряд ІНЕ має місце при роботі в частотному режимі з короткою тривалістю вимкненого стану тасітрону.

Більш того, в цьому випадку можна отримувати на навантаженні майже

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|----------------------|-----|
| | | | | | ДП. ДЕ62. 01. 000 ПЗ | Арк |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 19 |

прямокутні імпульси напруги. Очевидно, що чим більше відношення R/L , тим менше розряджається ІНЕ під час генерації імпульсу напруги.

2.4. Аналіз генерації високої напруги на навантаженні з паралельним конденсатором

Для отримання постійної, точніше, слабо пульсуючої напруги на навантаженні R_n'' паралельно їй включають накопичувальний, згладжувальний або фільтровий конденсатор C_ϕ , як показано на рис. 2.1. Для запобігання розряду C_ϕ через відкритий тасітрон S під час накачування ІНЕ введений блокувальний діод D . У результаті виходить схема, яка аналогічна схемі бустера і широко застосовується в транзисторних бестрансформаторних джерелах живлення для перетворення, регулювання та стабілізації підвищеної напруги [8-14,17-20].

На рис. 2.3 наведені часові діаграми роботи подібного генератора, але виконаного на тасітроні. Частини діаграм зі штрихуванням позначають періоди тривалістю τ , коли відкритий тасітрон і відбувається підкачка ІНЕ. Блокувальний діод D в ці періоди закритий, і енергія в навантаження надходить тільки з конденсатора C_ϕ , що супроводжується деякою його розрядкою. У періоди тривалістю θ навпаки тасітрон – закритий, але діод D – відкритий, і енергія надходить з ІНЕ до навантаження і конденсатора C_ϕ , що супроводжується підзарядом C_ϕ .

Теорія транзисторних бустерів добре описана в літературі [8-14,17-20], її висновки можна з деякими застереженнями застосувати і до тасітронного генератора. В ідеальному випадку, коли не позначаються активні втрати потужності, можна було б отримати багаторазову, в десятки разів більшу напругу на навантаженні щодо величини E . Однак, з урахуванням втрат ефект підвищення вихідної напруги генератора щодо величини E обмежується згідно формули:

$$u_n'' = \eta E / (1 - \gamma), \quad (2.7)$$

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|----------------------|------|
| | | | | | ДП. ДЕ62. 01. 000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 20 |

де η – ККД перетворення напруги ($\eta \sim 0,8-0,9$), γ - коефіцієнт заповнення імпульсів ($\gamma = \tau/T$).

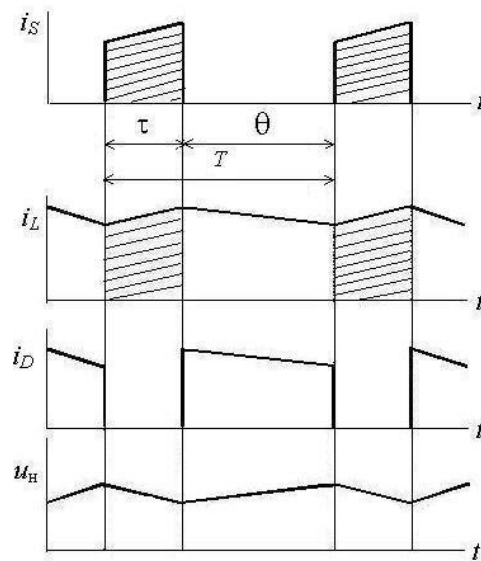


Рис. 2.3. Часові діаграми роботи генератора слабо пульсуючої напруги з накопичувальним конденсатором паралельно навантаженню

Також відомі формули для оцінки ефекту підвищення напруги, безпосередньо враховують величини активних опорів елементів схеми. В [9] для випадку рівності активних опорів ланцюгів зарядки (накачки) і розрядки ІНЕ (r) виведена формула:

$$U_H'' = E/[1+2(r/R_H'')](1-\gamma). \quad (2.8)$$

В іншій формулі [8] враховується різниця в величинах опорів ланцюгів зарядки (r_z) і розрядки (r_p):

$$U_H'' = E(1-\gamma)/[(1-\gamma)^2 + \gamma r_z/R_H'' + (1-\gamma)r_p/R_H'']. \quad (2.9)$$

Потужність сумарних втрат в тасітроні під час перехідних процесів включення і виключення (кожен тривалістю $\tau_{\text{пер}}$) можна оцінити за формулою [8]:

$$P_{S,\text{пер}} = \tau_{\text{пер}} I_0 R_H''/3(1-\gamma)T, \quad (2.10)$$

де I_0 – середній за період T струм ІНЕ.

У підсумку існує граничне значення

$$\gamma_{\text{гр}} = 1-(r/R_H'')^{1/20}, \quad (2.11)$$

вище якого ефект підвищення напруги пропадає [9]. Звідси, для транзисторних бустерів коефіцієнту вибирають не більше 0,8-0,9, а максимальне підвищення напруги не більше 5. У разі тасітронних генераторів внаслідок їх високовольтності і меншому за величиною відношенню r/R_n'' очікується істотно більше підвищення напруги.

В якості блокуючого діода можна застосовувати не тільки напівпровідникові вентилі (на практиці це ланцюжки з великої кількості послідовно включених дискретних приладів), а й швидкодіючий високовольтний імпульсний газорозрядний вентиль (імпульсний газотрон) V , показаний як варіант виконання на рис. 2.1. Причому найбільш доцільно застосовувати газотрон з холодним катодом. У них для прискорення відновлення вентильної міцності вводиться катодна сітка (деіонізаційний фільтр), сполучений з катодом. Застосування кенотронов і газотронів з термокатодом недоцільним через необхідність введення в схему додаткового розжарювального трансформатора в високовольтному виконанні, що ускладнює конструкцію генератора і вимагає витрати потужності на підігрів катода.

2.5. Розробка пропозиції по створенню нового тасітрона гібридної конструкції для генерації високої напруги на навантаженні з паралельним конденсатором

З огляду на ту обставину, що в схемі генератора з паралельним конденсатором у навантаження однойменні електроди тасітрона і газотрона можуть мати спільну точку з'єднання і знаходитися під однаковим потенціалом, можна застосовувати замість двох приладів один комбінований прилад гібридної конструкції, що складається з тасітронних і газотронних частин, але має спільний електрод для обох частин. Таким спільним електродом для обох частин може бути анод (як це видно з рис. 2.1) або катод. Вибір конструктивного варіанту, очевидно, визначається наявністю відповідного промислового приладу і вимогами споживача даної техніки.

З практичних міркувань в якості спільного електрода доцільно вибирати більш складний по конструкції електрод, а таким найчастіше є катод. На

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|----------------------|------|
| | | | | | ДП. ДЕ62. 01. 000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 22 |

рис. 2.4 показані варіанти побудови схеми генератора з подібним приладом для різних полярностей вихідної напруги.

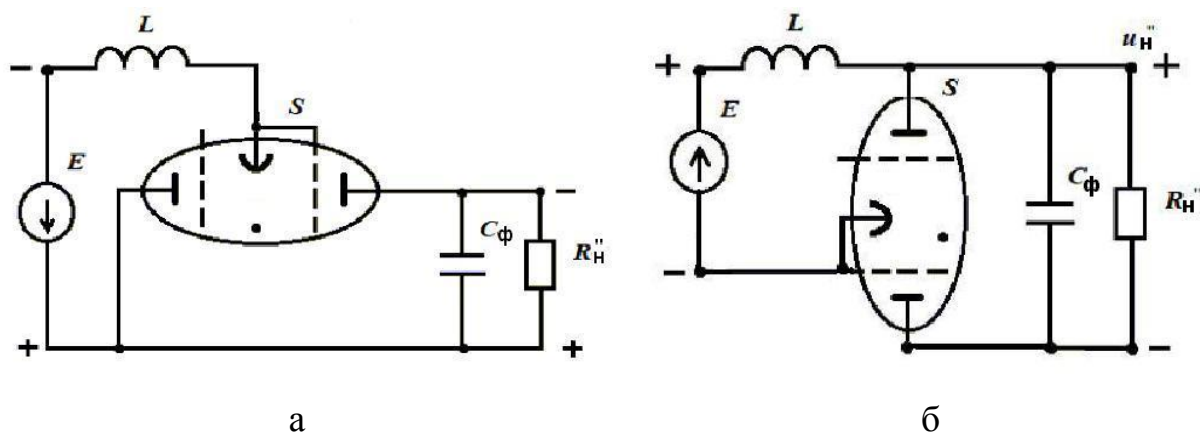


Рис. 2.4. Схеми генератора високої напруги на комбінованому приладі (тасітрон + газотрон)

Подібна схема генератора практично реалізовуюча, оскільки є світовий досвід успішної розробки високовольтних газорозрядних приладів досить складної конструкції [15,23], а наші дослідження на макетних зразках підтверджують це припущення. Таким чином, створення комбінованого приладу "тасітрон + імпульсний газотрон" можна розглядати як можливе завдання для електронної промисловості.

| | | | | |
|------|------|----------|--------|------|
| | | | | |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

ДП. ДЕ62. 01. 000 ПЗ

Арк

23

3. МОДЕЛЮВАННЯ ГЕНЕРАЦІЇ ІМПУЛЬСІВ ВИСОКОЇ НАПРУГИ

З усього різноманіття можливих схем побудови тасітронного генератора високої напруги були вибрані два базових варіанти, які представлені на рис. 3.1. Один призначений генерувати коротко-імпульсну напругу, а другий – слабо пульсуючу майже постійну напругу. У першому варіанті навантаження R_n' підключається зліва до тасітрону S , а в другому варіанті навантаження R_n'' підключається паралельно до конденсаторного накопичувача енергії або фільтру C_Φ і разом з останнім з'єднана з ІНЕ (L) і тасітроном S через діод блокуючий D .

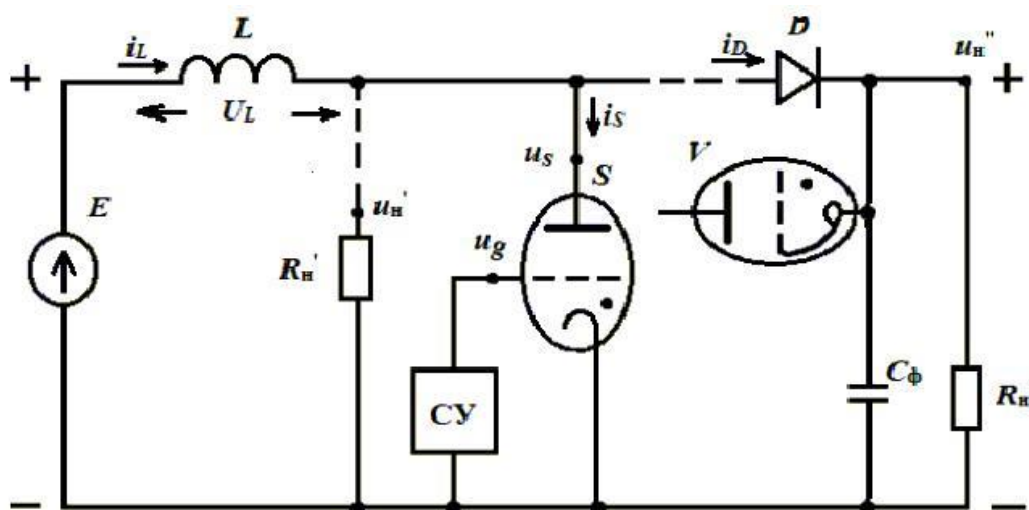


Рис. 3.1. Схема генератора високої напруги. Штриховою лінією показані варіанти включення навантаження (R_n' або R_n''). C_Φ - конденсаторний фільтр, D - блокуючий діод, E - джерело живлення, L - ІНЕ, S - тасітрон, V - блокуючий газотрон, CU - система управління тасітроном

В даній роботі було проведено моделювання першого варіанту схеми, який додатково зображений на рис. 3.2. Для другого варіанту схеми генератора з підключенням конденсатора паралельно навантаженню R_n'' моделювання в цьому проекті не проведено, оскільки цей варіант досить детально проаналізований в літературі стосовно до транзисторних схем [8-

14,17-20], і на даному етапі дослідження відомі дані для транзисторних схем можна застосувати до тасітронної схеми.

Навантаження моделюємо активним резистором. Така модель цілком підходить по відношенню до різних високовольтних електронно-вакуумних приладів, коронного розряду, рідких середовищ в допробійному режимі, озонаторів та інших фізичних об'єктів.

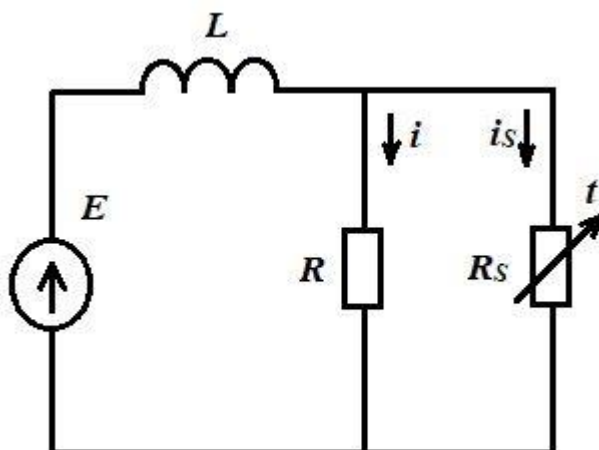


Рис. 3.2. Перший варіант схеми з рис. 3.1. E – джерело живлення, L – ІНЕ, R – активне навантаження, R_s – опір тасітрону, що змінюється у часі t .

Але проблемним є вибір електричної моделі тасітрону. Очевидно, через складності фізичних процесів, що протікають в ньому на різних етапах роботи, наскрізну модель створити практично не можливо. Оскільки для нас найбільш цікавим є етап зростання напруги на навантаженні під час вимкнення тасітрона, будемо розглядати саме цей етап. Як відомо, процес вимкнення тасітрона пов'язаний з деіонізацією розрядного (міжелектродного) проміжку катод-анод. Деіонізація – це процес рекомбінації вільних носіїв струму – іонів і електронів. Цей процес в електричному відношенні можна розглядати як процес зростання електричного опору тасітрона. На підставі цього будемо модулювати тасітрон на етапі вимкнення і зростання напруги на навантаженні змінним в часі опором $R_s(t)$.

Нам вдалося знайти в літературі [15] дані по зміні опору промислового тасітрона, котрими ми і скористуємося в нашій роботі.

Робимо припущення, що джерело живлення E є ідеальним генератором напруги, тобто допускає проходження через нього будь-якої амплітуди імпульсного струму. На практиці ця умова виконується за рахунок підключення паралельно до джерела живлення конденсатора великої ємності.

Отже, припустимо, що опір тасітрона в період вимкнення R_S змінюється за законом [15]:

$$R_S = \rho \times t + \rho_0, \quad (3.1)$$

де $\rho = \frac{dR_S}{dt}$.

Визначаємо спільний опір R_Σ паралельно ввімкнених резисторів R і R_S :

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_\Sigma} &= \frac{1}{R} + \frac{1}{R_S}, \\ \frac{1}{R_\Sigma} &= \frac{R}{RR_S} + \frac{R}{RR_S} = \frac{R + R_S}{RR_S}, \\ R_\Sigma &= \frac{RR_S}{R + R_S}. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Записуємо рівняння за другим законом Кірхгофа для нашого ланцюга:

$$\begin{aligned} E &= L \frac{di}{dt} + R_\Sigma i, \\ E &= L \frac{di}{dt} + \frac{RR_S}{R + R_S} i, \\ E &= L \frac{di}{dt} + \frac{R(\rho t + \rho_0)}{R + \rho t + \rho_0} i = L \frac{di}{dt} + \frac{R\rho t + R\rho_0}{R + \rho t + \rho_0} i. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Робимо заміни:

$$\begin{aligned} a &= R\rho_0, \\ b &= R\rho, \\ c &= R + \rho_0, \end{aligned}$$

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|----------------------|------|
| | | | | | ДП. ДЕ62. 01. 000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 26 |

$$d = \rho. \quad (3.4)$$

Отримуємо:

$$E = L \frac{di}{dt} + \frac{a + bt}{c + dt}. \quad (3.5)$$

Даний вираз (3.5) є неоднорідним рівнянням першого порядку зі змінним коефіцієнтом. Найбільш просто його розв'язувати чисельним методом кінцевих малих різниць. Отримане рівняння було розв'язано в *EXCELL*.

Код програми знаходиться в ДОДАТОК А.

На рис. 3.3 приведено приклад розрахунку динаміки зміни напруги на навантаженні u і струму i через ІНЕ (L) для одного з наборів вихідних даних. Відмітимо, що часові інтервали, на яких вирішувалась задача були 1 і 3 мкс. Ці інтервали розбивались на 500 часових відрізків. Номери цих відрізків записані на горизонтальних осях розрахункових графіків.

Можна побачити, що розрахункові криві відповідають діаграмам, представленим на рис. 2.2 у розділ 2.

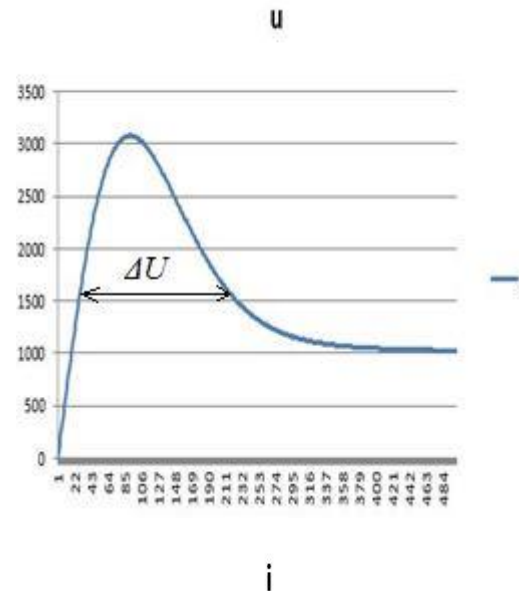
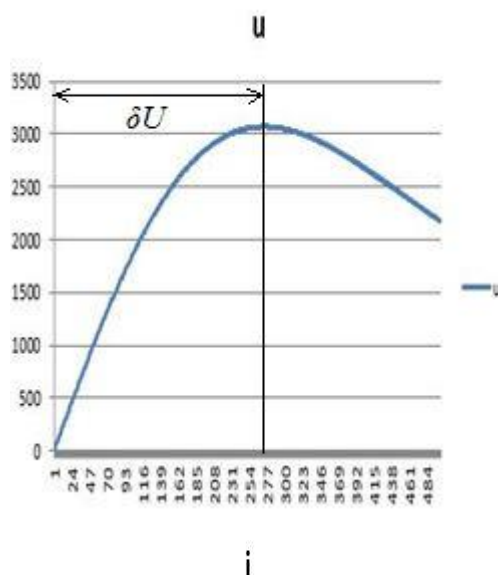
| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|----------------------|-----|
| | | | | | ДП. ДЕ62. 01. 000 ПЗ | Арк |
| | | | | | | 27 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

R_H 1 кОм
 L 100 мкГн
 i_0 20 А
 U_H 3.1 кВ
 ΔU 1146 нс
 δU 544 нс
 U_H/P_L 155
 Sc

1 мкс

3 мкс

Діагра-
ма u



Діагра-
ма i

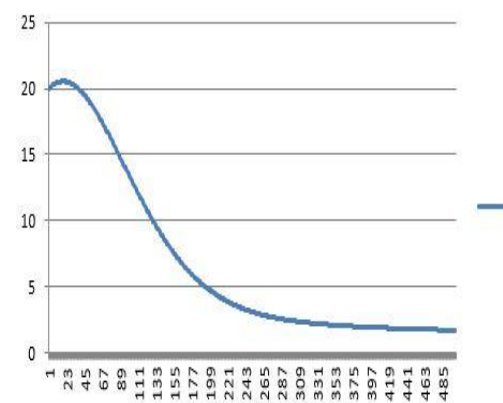
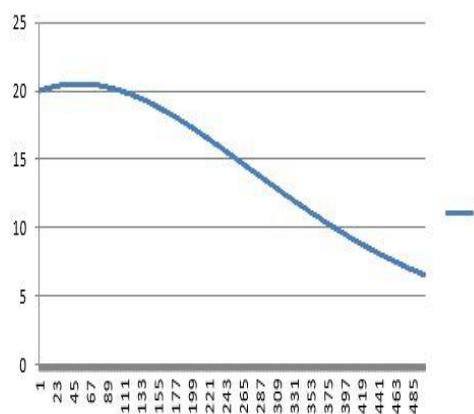


Рис. 3.3. Приклад розрахунку імпульсів напруги на навантаженні і струму ІНЕ на етапі вимикання тасітрона.

| | | | | |
|------|------|----------|--------|------|
| | | | | |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

ДП. ДЕ62. 01. 000 ПЗ

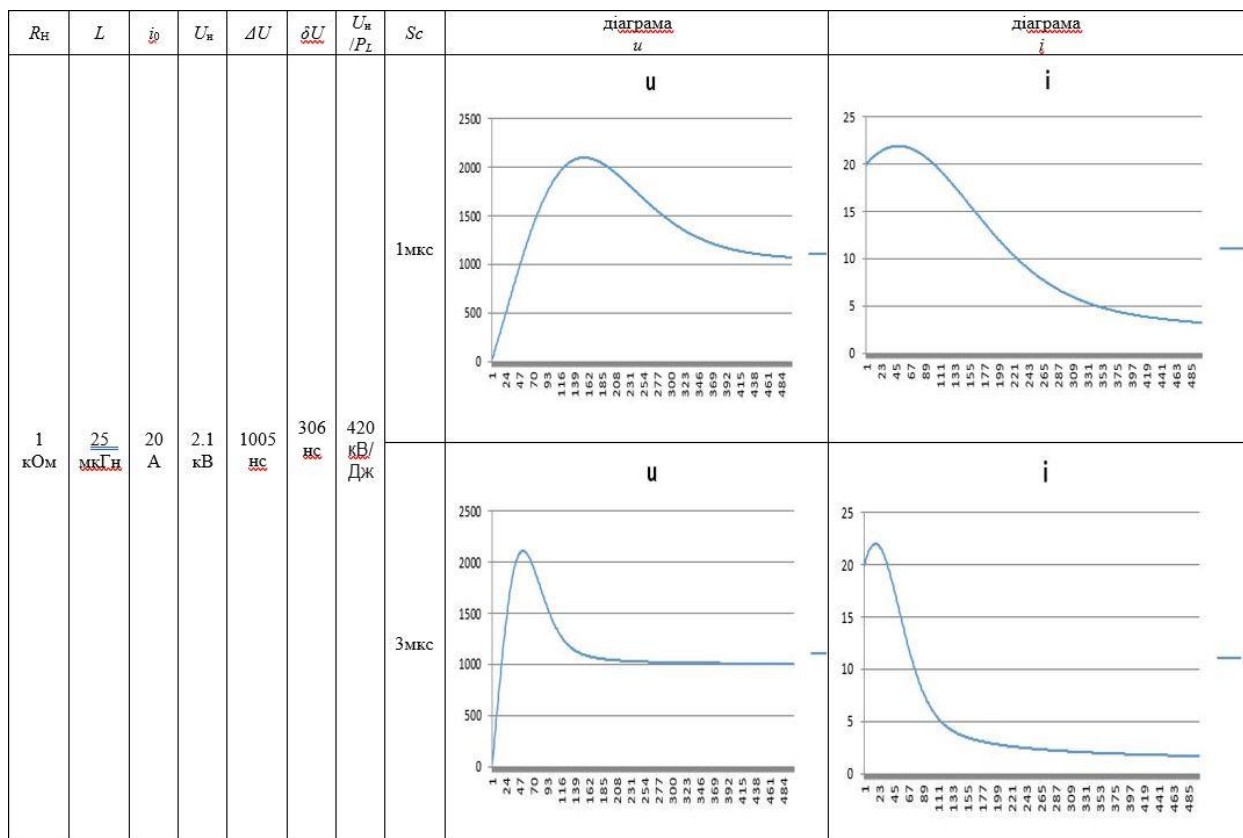


Рис. 3.4. Розрахунок імпульсів напруги на навантаженні і струму ІНЕ на етапі вимикання тасітрона № 1

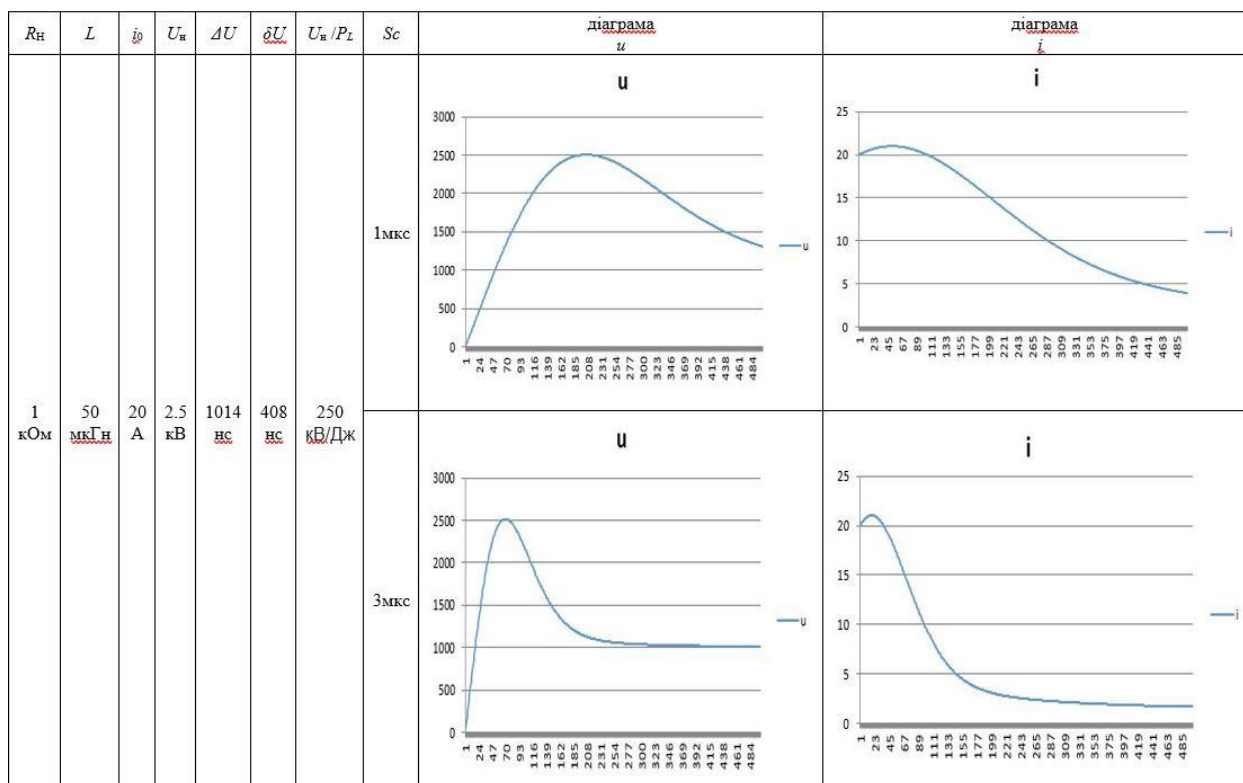


Рис. 3.5. Розрахунок імпульсів напруги на навантаженні і струму ІНЕ на етапі вимикання тасітрона № 2

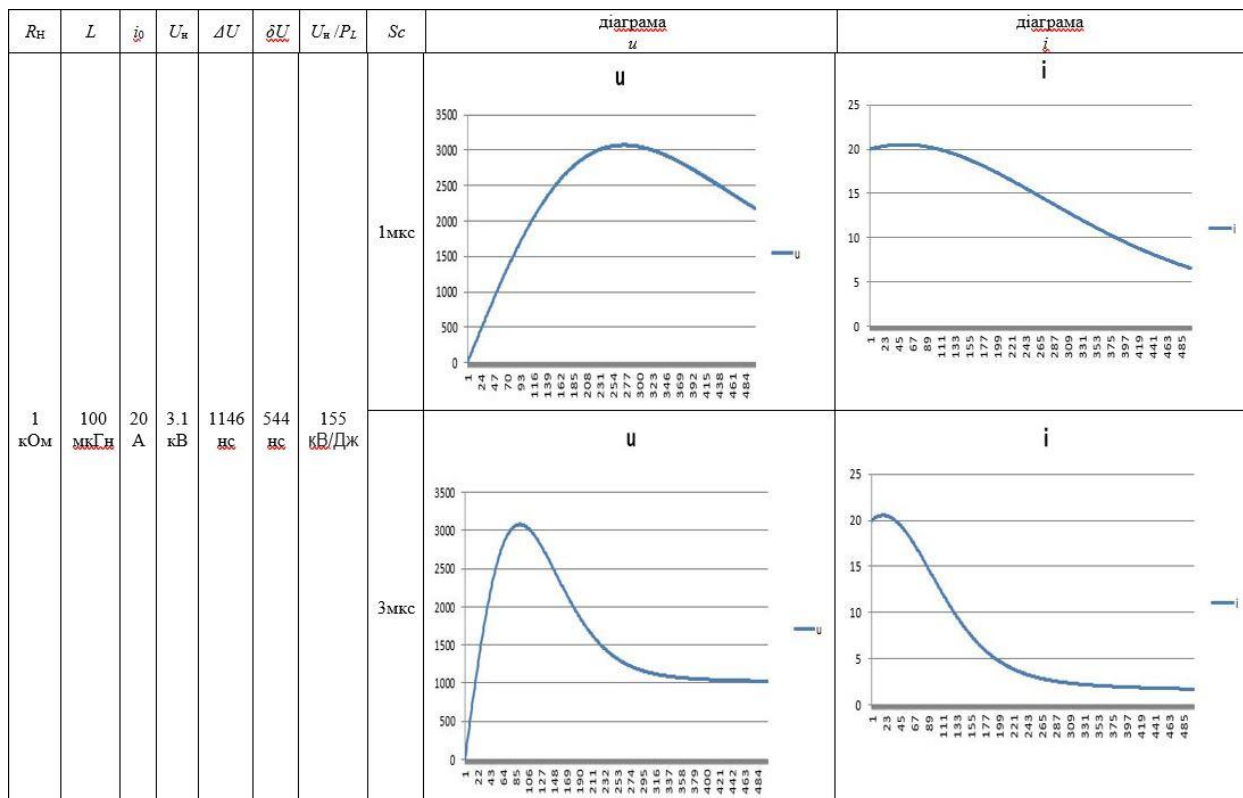


Рис. 3.6. Розрахунок імпульсів напруги на навантаженні і струму ІНЕ на етапі вимикання тасітрона № 3

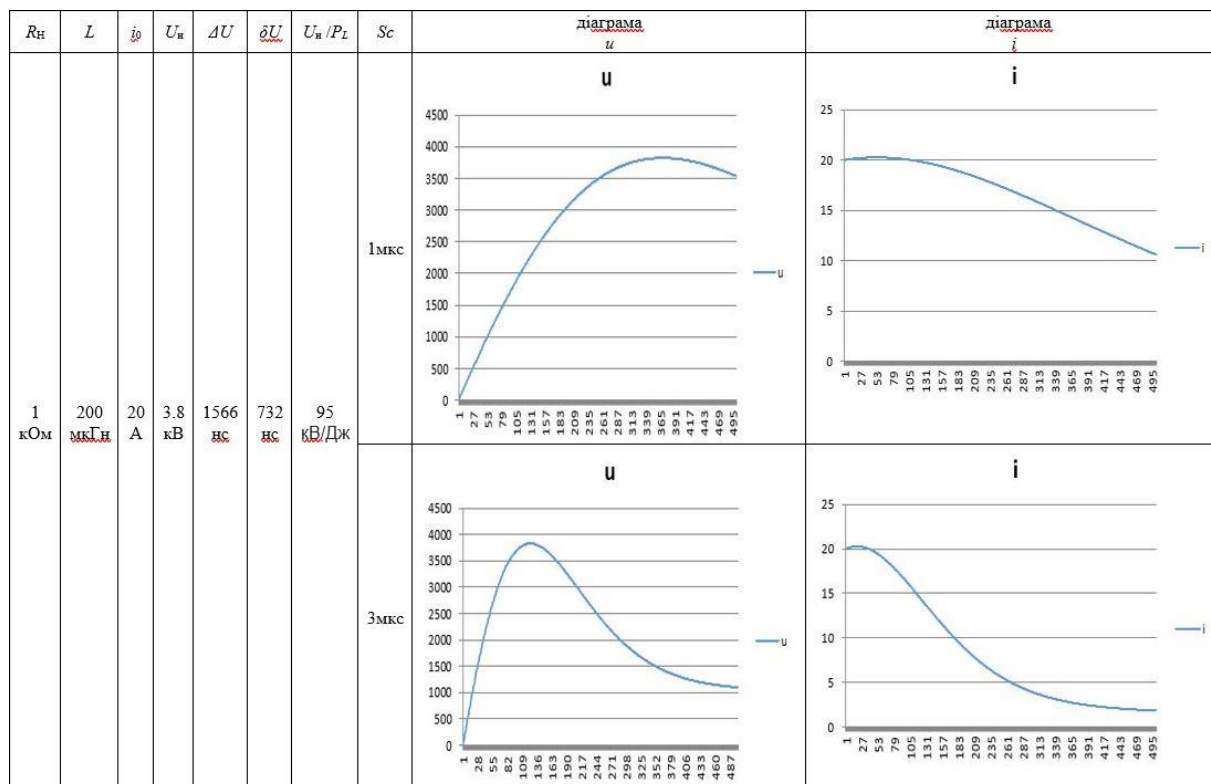


Рис. 3.7 Розрахунок імпульсів напруги на навантаженні і струму ІНЕ на етапі вимикання тасітрона № 4

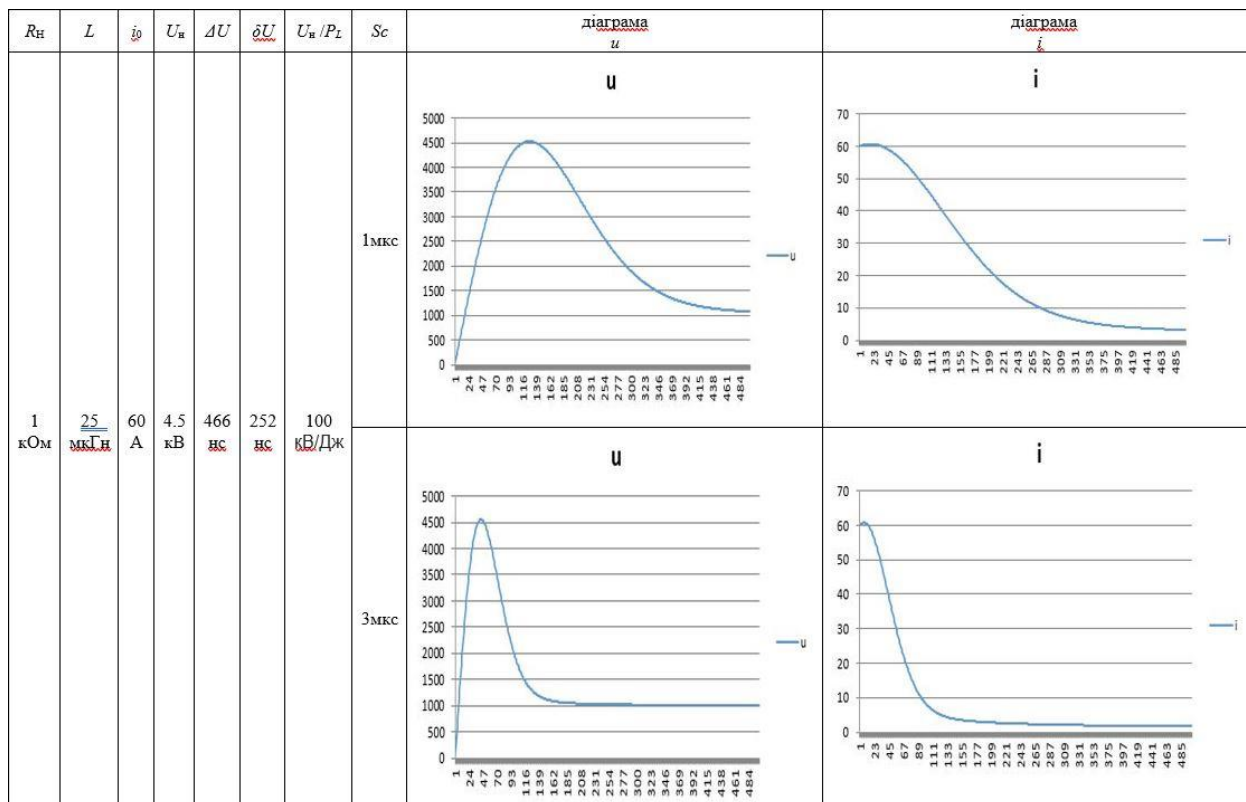


Рис. 3.8. Розрахунок імпульсів напруги на навантаженні і струму ІНЕ на етапі вимикання тасітрона № 5

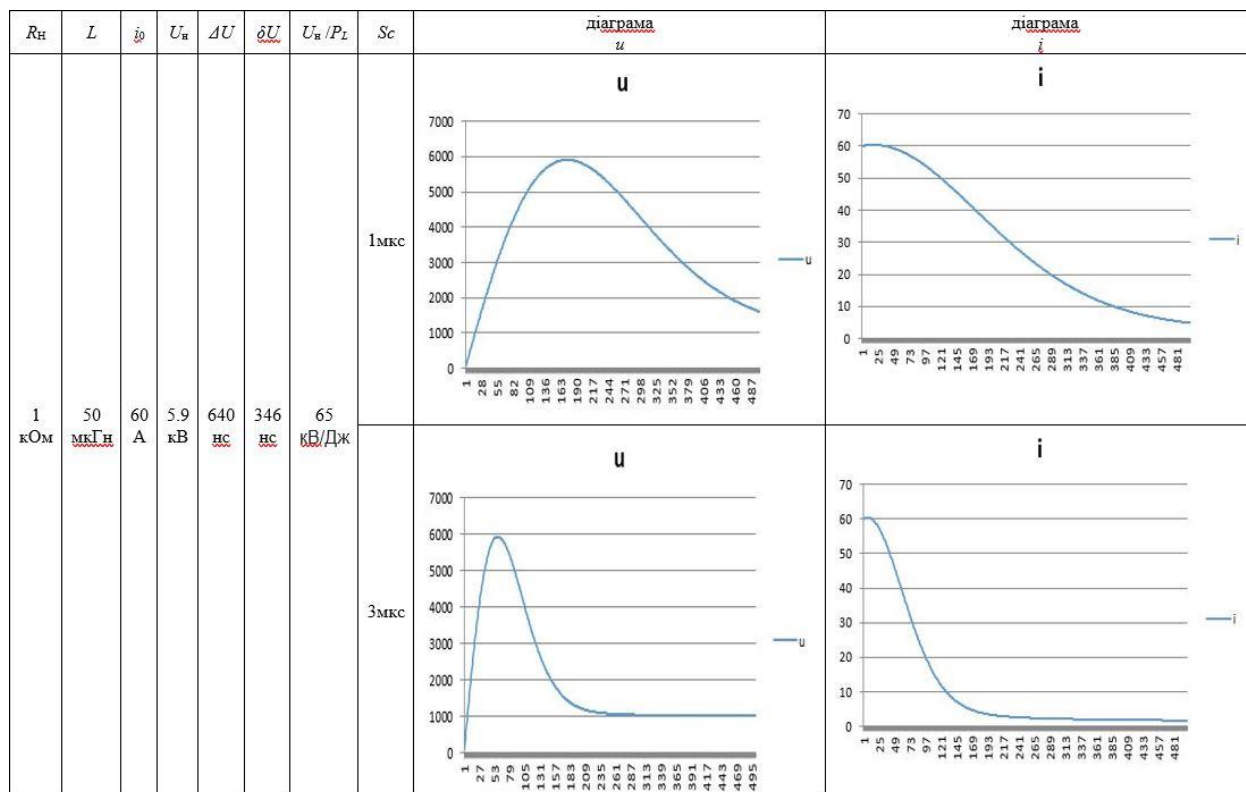


Рис. 3.9. Розрахунок імпульсів напруги на навантаженні і струму ІНЕ на етапі вимикання тасітрона № 6

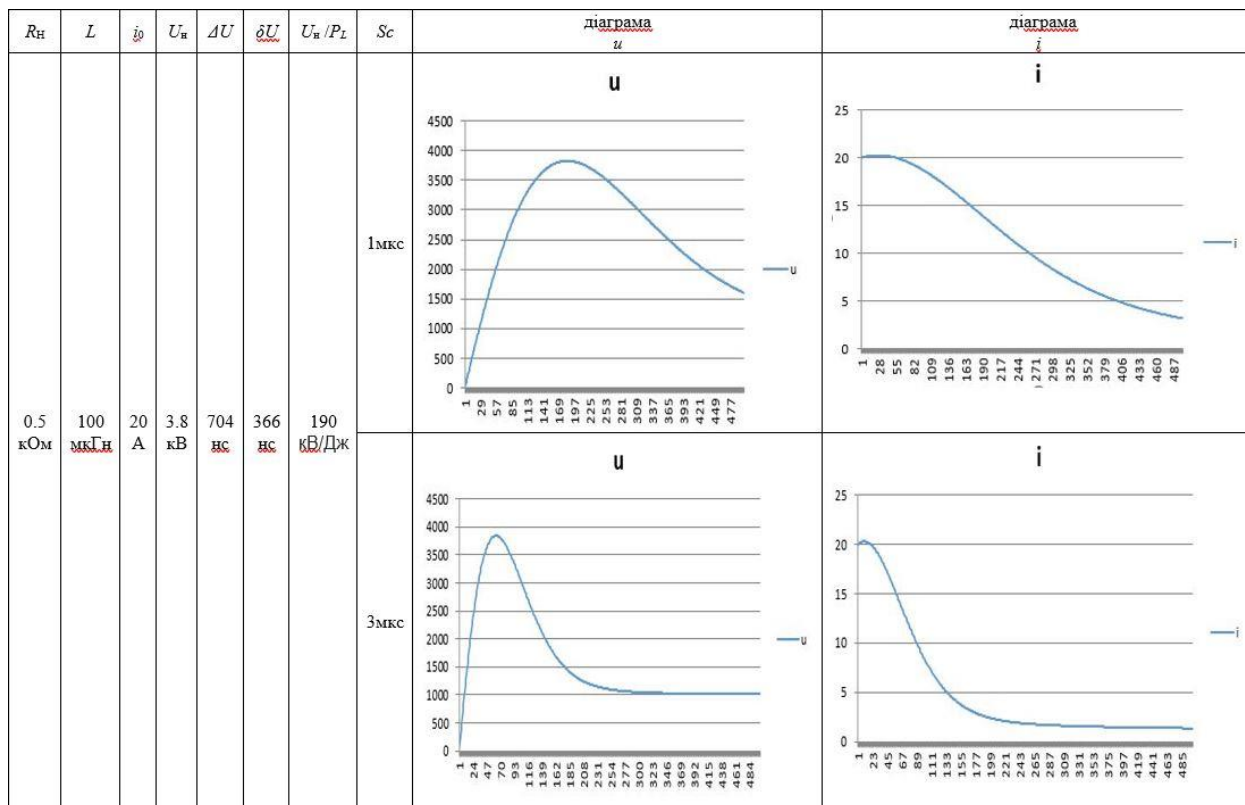


Рис. 3.10. Розрахунок імпульсів напруги на навантаженні і струму ІНЕ на етапі вимикання тасітрона № 7

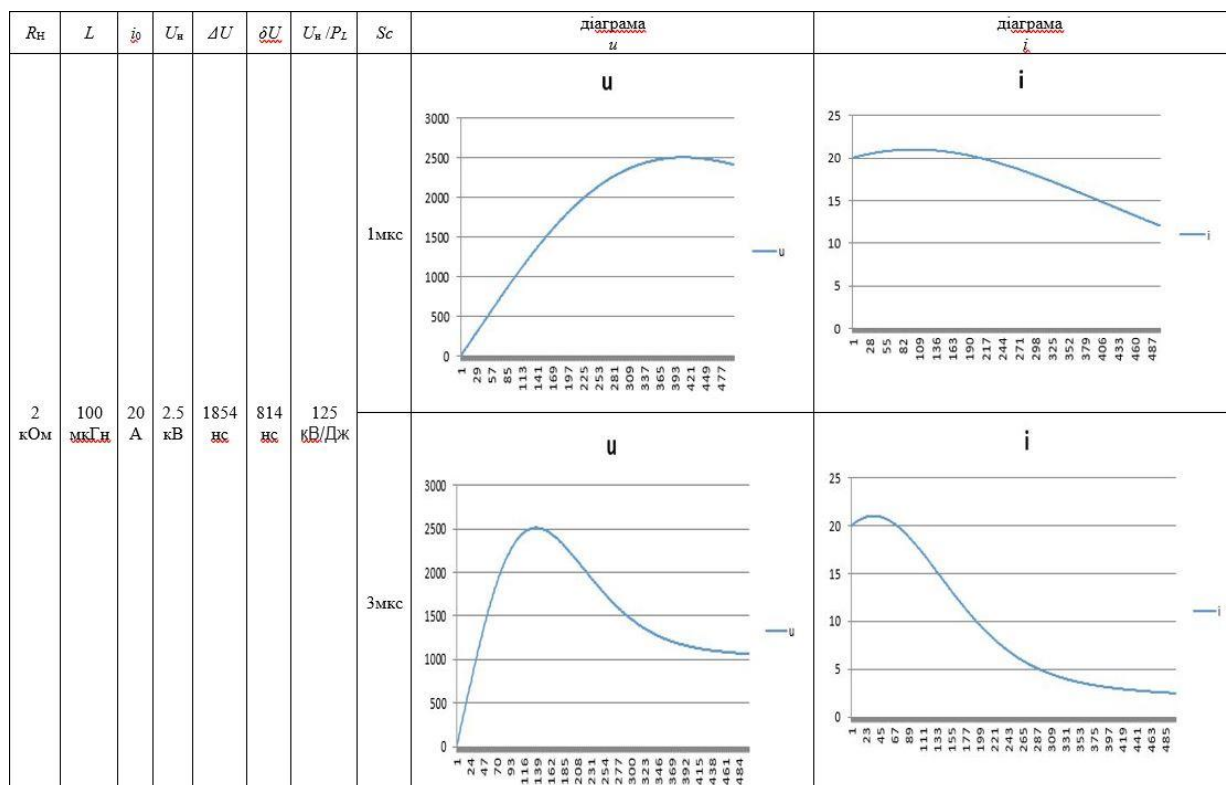


Рис. 3.11. Розрахунок імпульсів напруги на навантаженні і струму ІНЕ на етапі вимикання тасітрона № 8

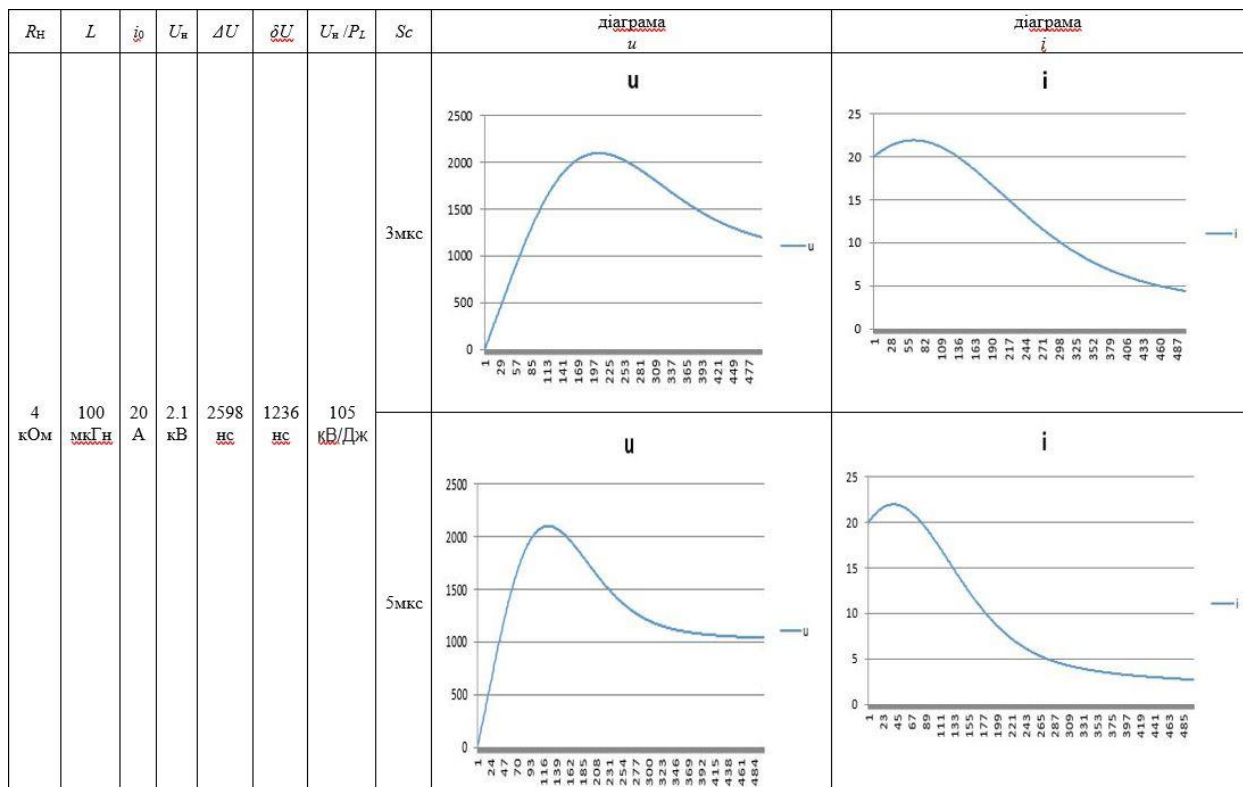


Рис. 3.12. Розрахунок імпульсів напруги на навантаженні і струму ІНЕ на етапі вимикання тасітрона № 9

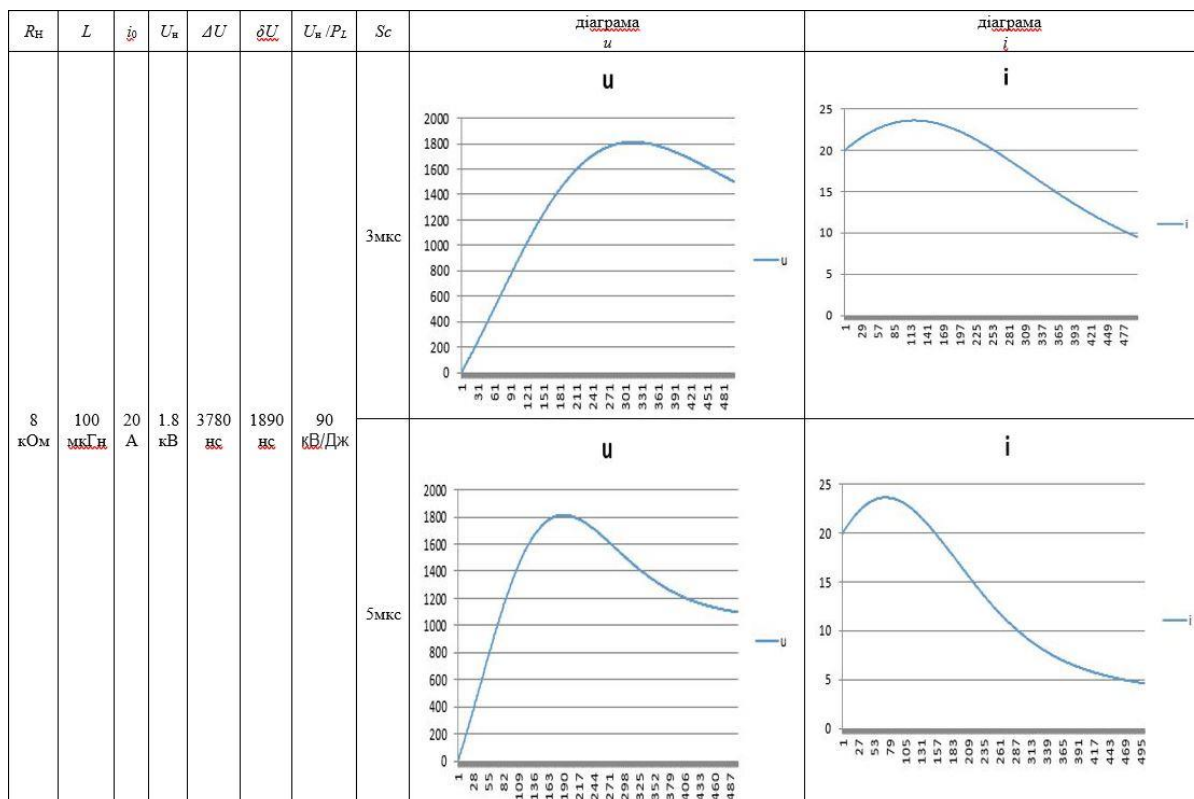


Рис. 3.13. Розрахунок імпульсів напруги на навантаженні і струму ІНЕ на етапі вимикання тасітрона № 10

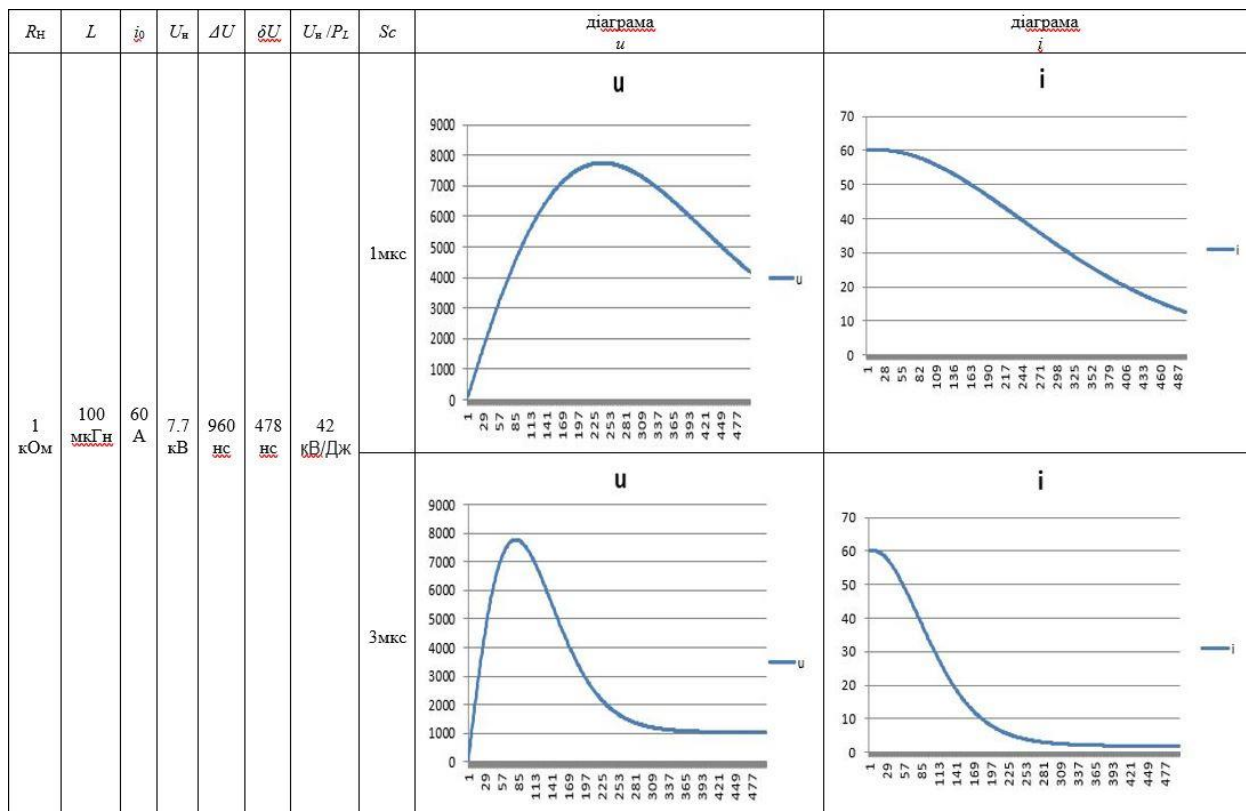


Рис. 3.14. Розрахунок імпульсів напруги на навантаженні і струму ІНЕ на етапі вимикання тасітрона № 11

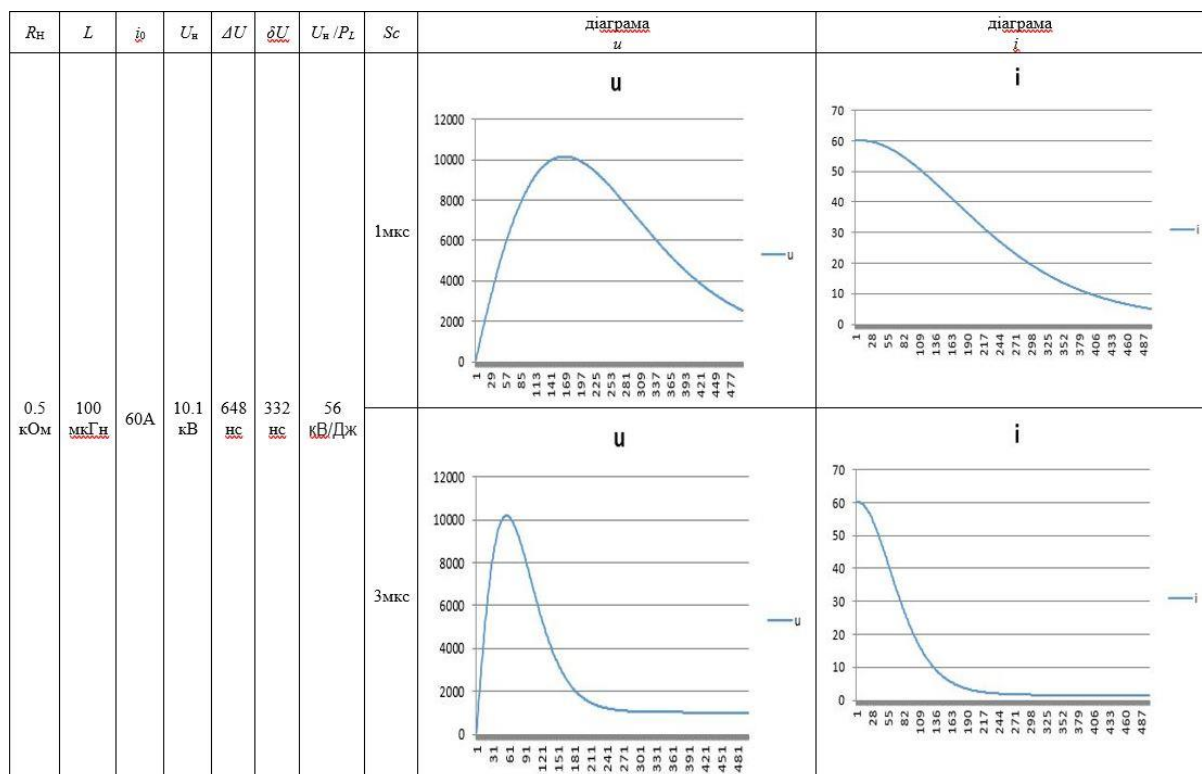


Рис. 3.15. Розрахунок імпульсів напруги на навантаженні і струму ІНЕ на етапі вимикання тасітрона № 12

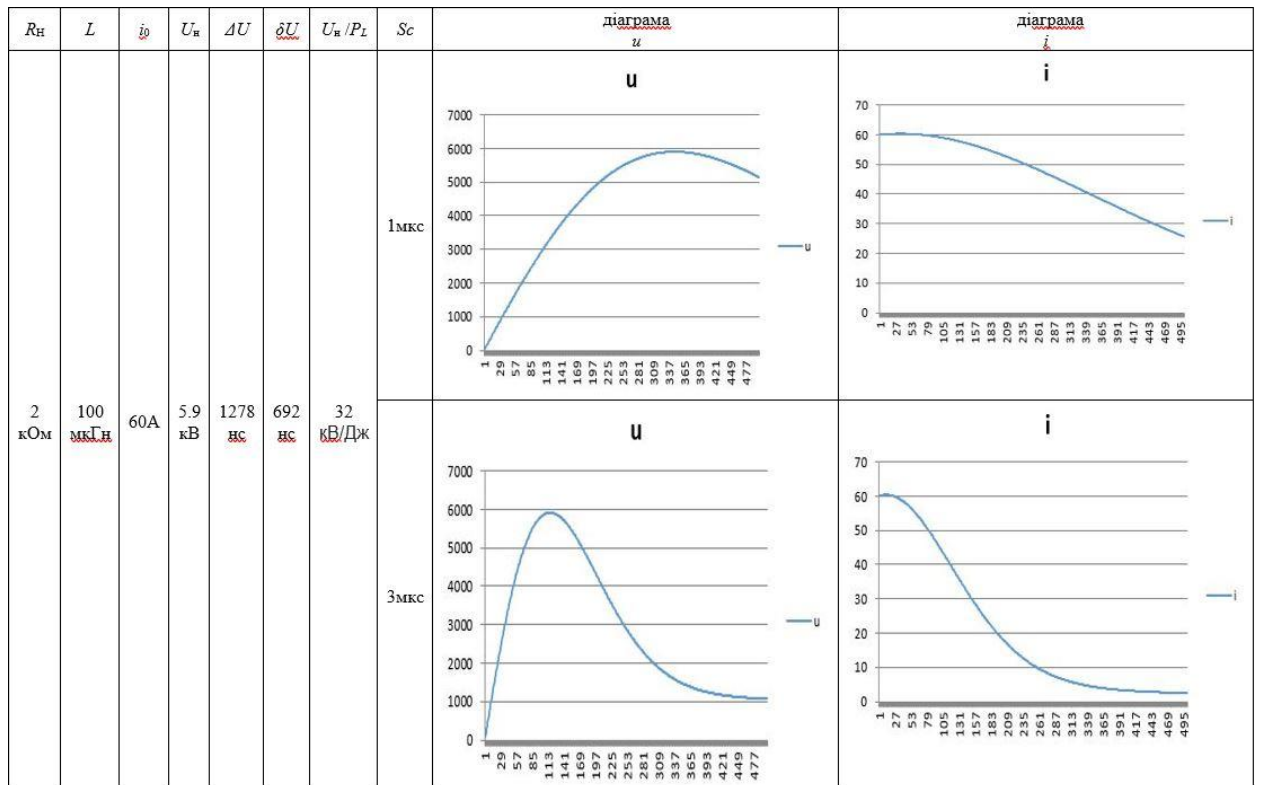


Рис. 3.16. Розрахунок імпульсів напруги на навантаженні і струму ІНЕ на етапі вимикання тасітрона № 13

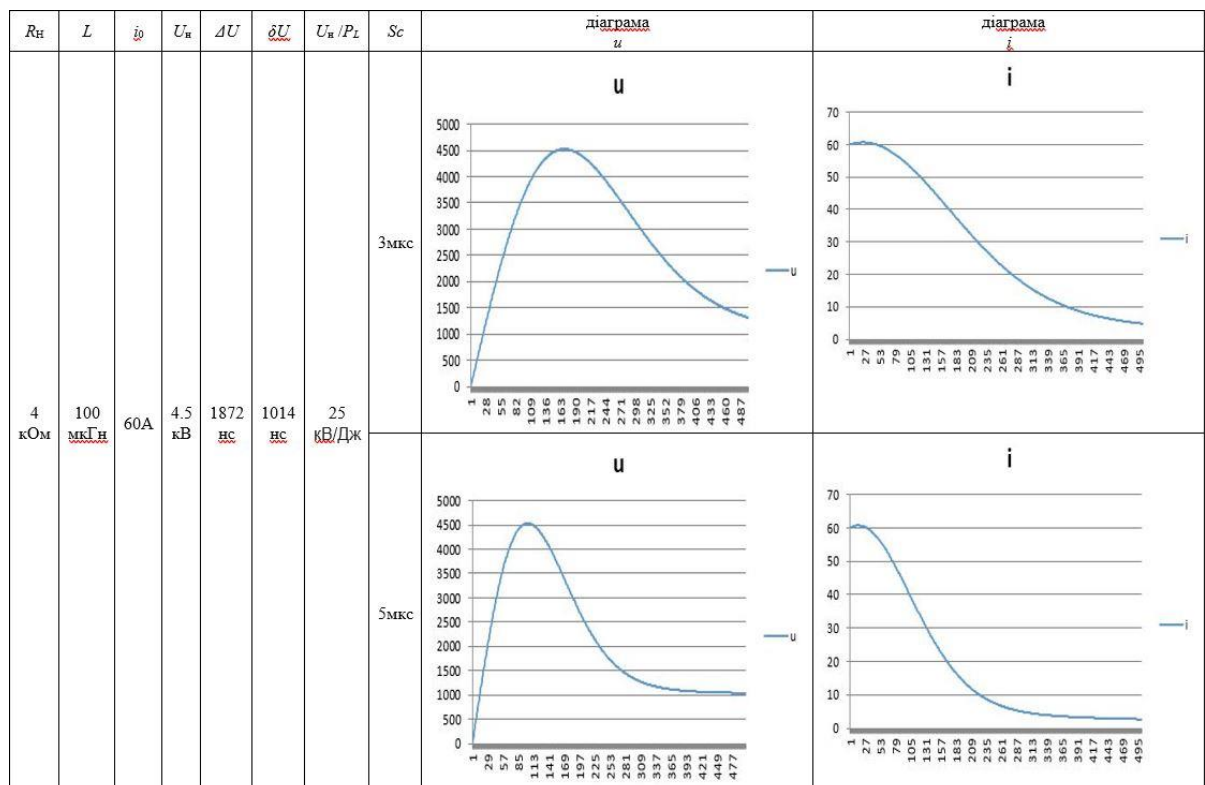


Рис. 3. 17. Розрахунок імпульсів напруги на навантаженні і струму ІНЕ на етапі вимикання тасітрона № 14

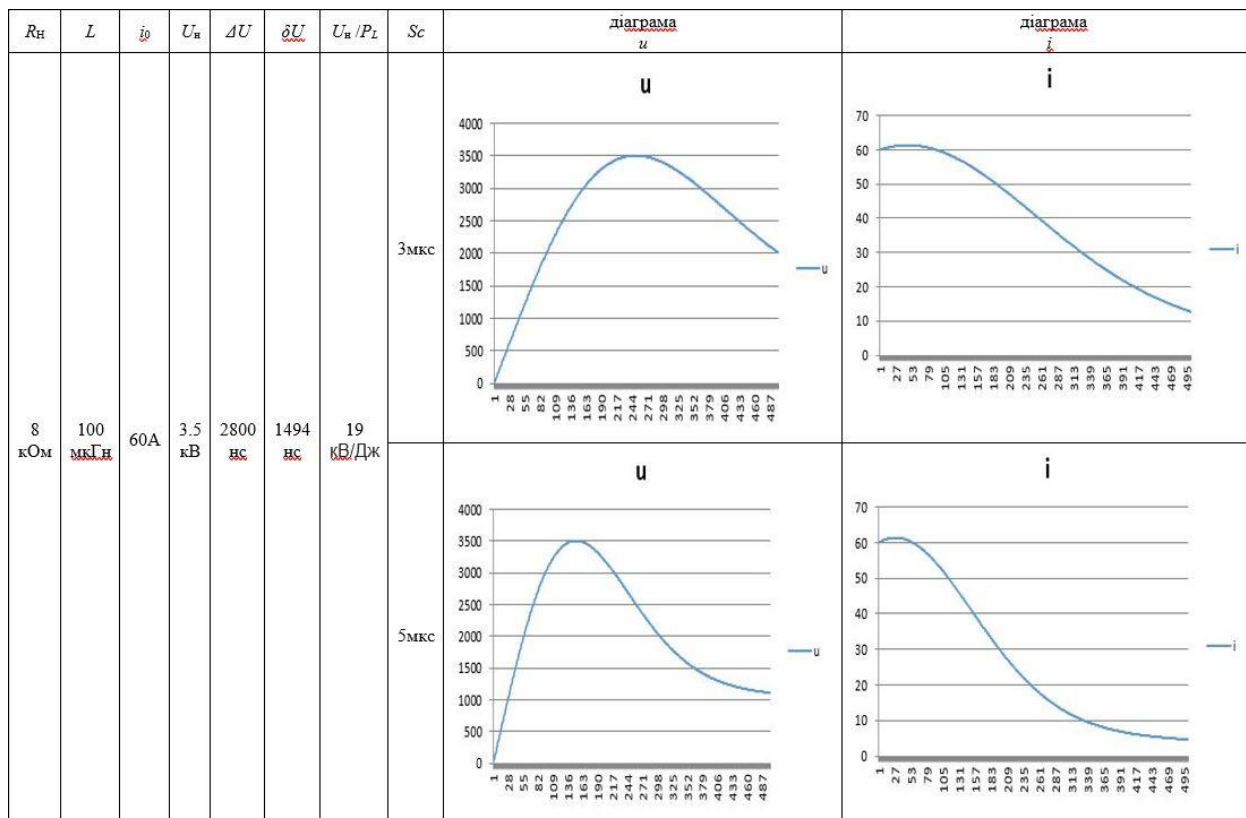


Рис. 3.18. Розрахунок імпульсів напруги на навантаженні і струму ІНЕ на етапі вимикання тасітрона № 15

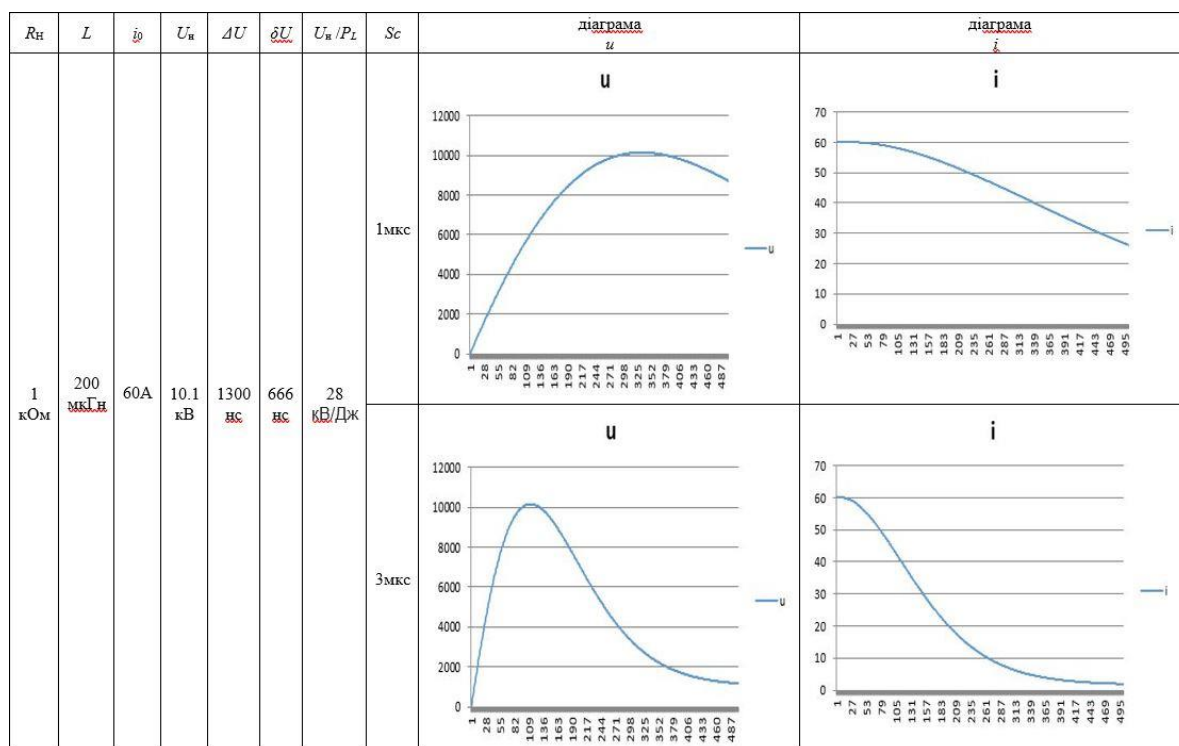


Рис. 3.19. Розрахунок імпульсів напруги на навантаженні і струму ІНЕ на етапі вимикання тасітрона № 16

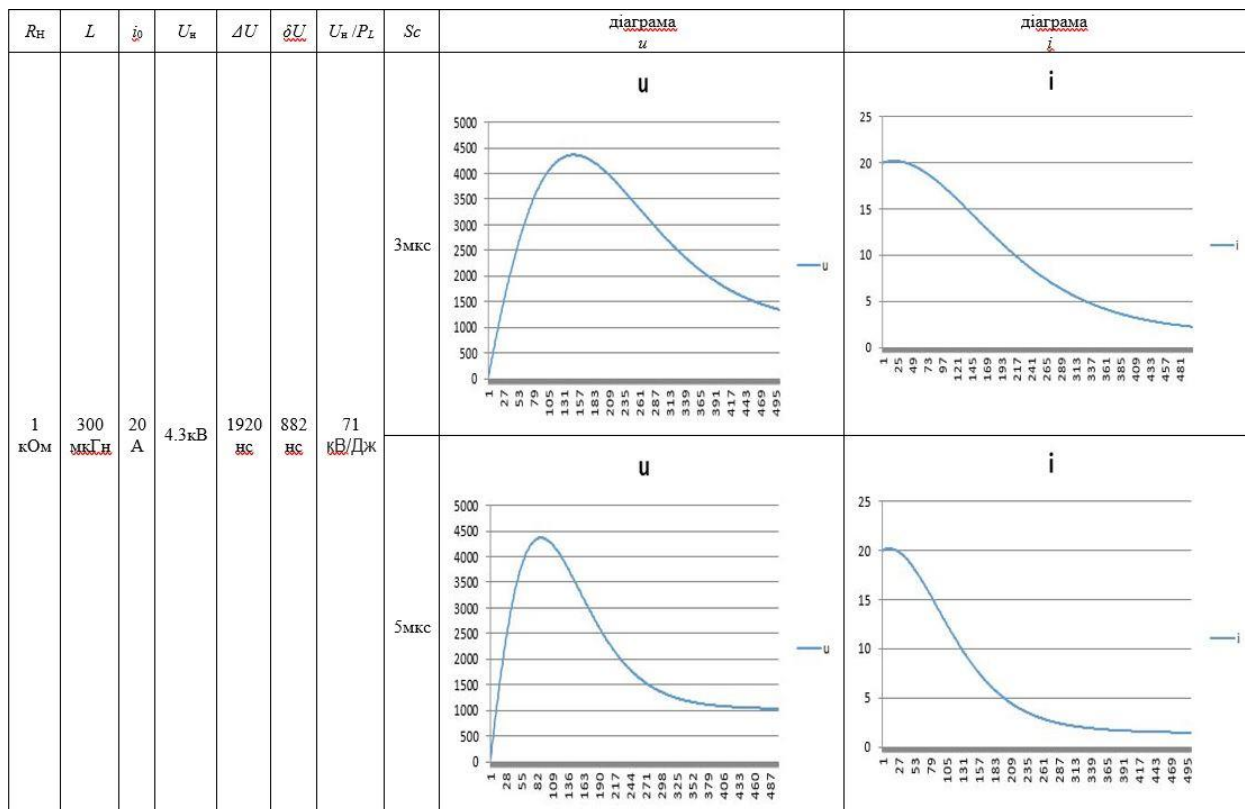


Рис. 3.20. Розрахунок імпульсів напруги на навантаженні і струму ІНЕ на етапі вимикання тасітрона № 17

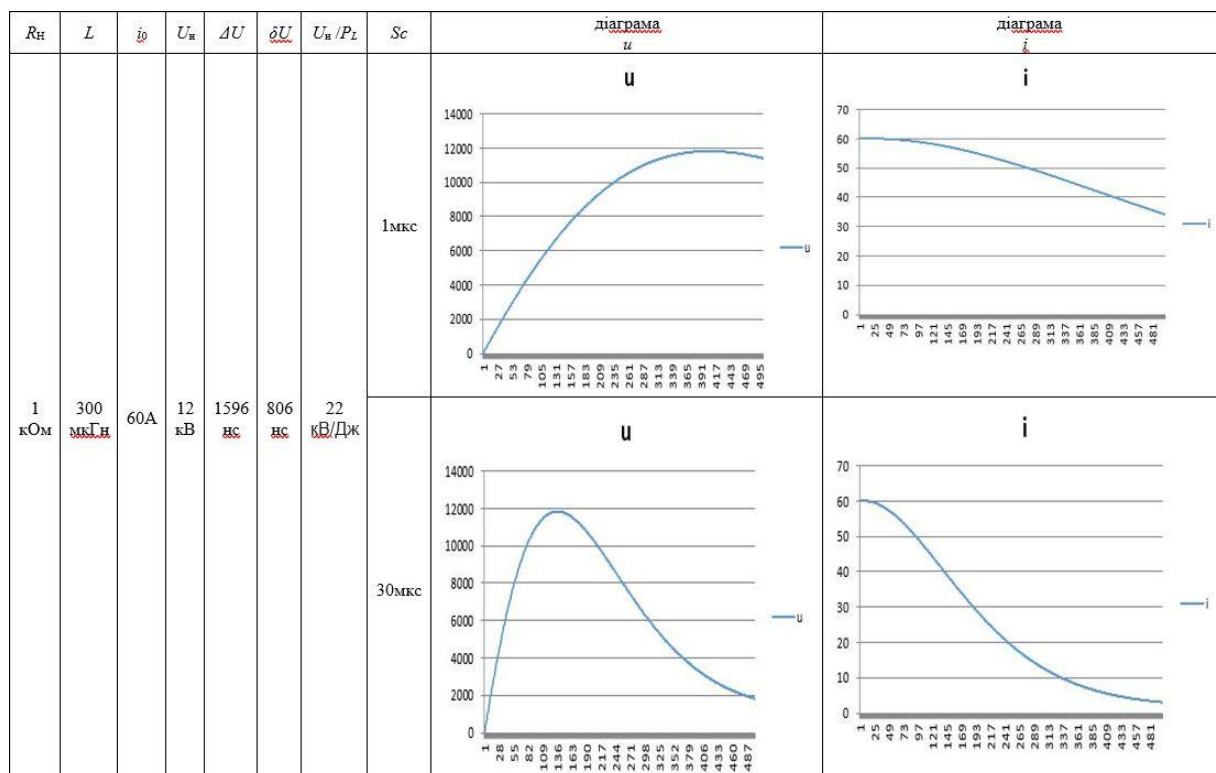


Рис. 3.21. Розрахунок імпульсів напруги на навантаженні і струму ІНЕ на етапі вимикання тасітрона № 18

На рис. 3.4 – 3.21 представлені розрахунки імпульсів напруги на навантаженні і струму ІНЕ на етапі вимикання тасітрона.

На рис. 3.22 – рис. 3.29 представлені результати обробок чисельних розрахунків при різних значеннях R та L , $E = 1\text{ кВ}$. Тут U – амплітуда імпульсу на навантаженні, W – енергія накачки ІНЕ, δu – тривалість фронту імпульсу напруги на навантаженні R , Δu – ширина імпульсу напруги на навантаженні на рівні 0,5 (50 %) від максимуму u . Відношення U/W характеризує ефективність генерації імпульсу напруги на навантаженні.

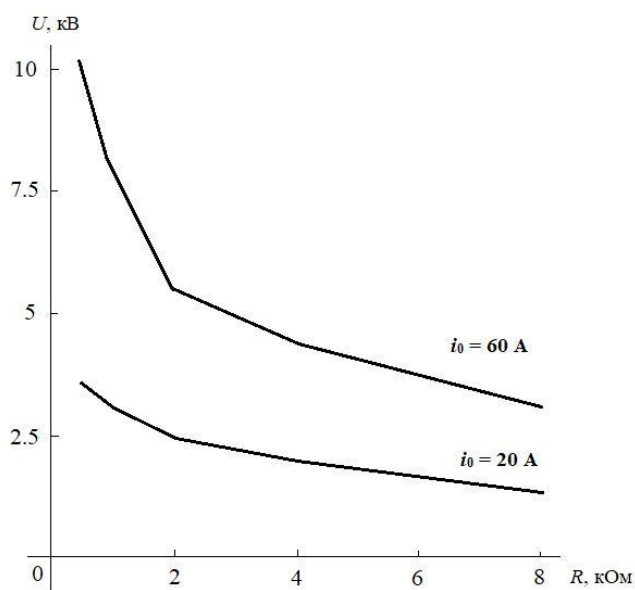


Рис. 3.22. Графіки залежності амплітуди імпульсу напруги на навантаженні від його опору при $L = 100\text{ мкГн}$, $E = 1\text{ кВ}$.

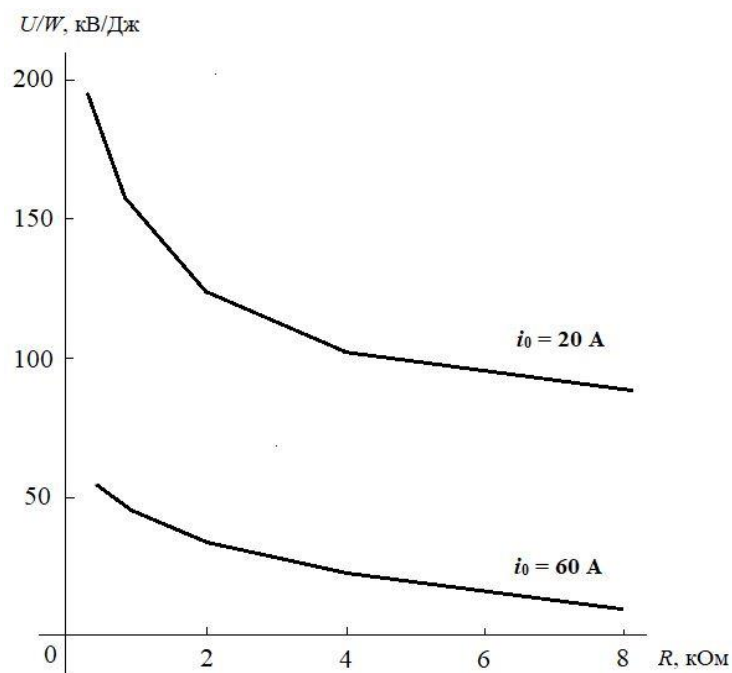


Рис. 3.23. Графіки залежності ефективності генерації імпульсу напруги від опору навантаження при $L = 100$ мкГн, $E = 1$ кВ.

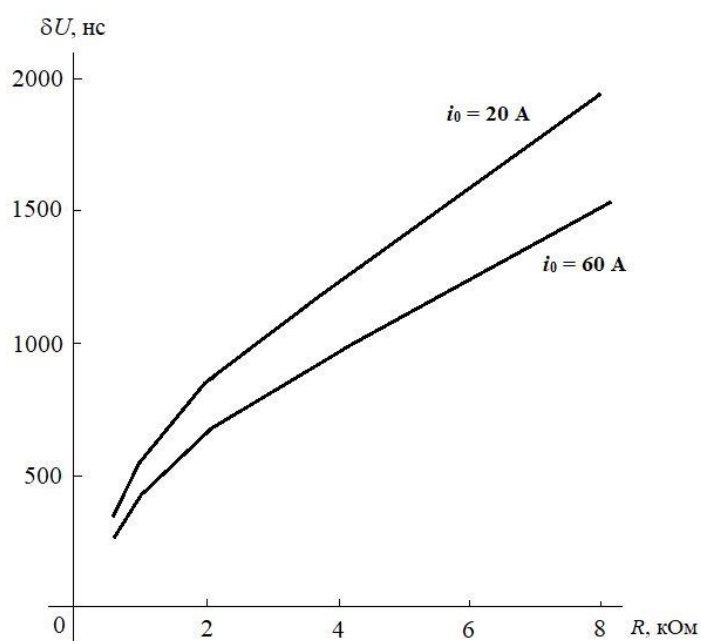


Рис. 3.24. Графіки залежності тривалості фронту імпульсу напруги від опору навантаження при $L = 100$ мкГн, $E = 1$ кВ.

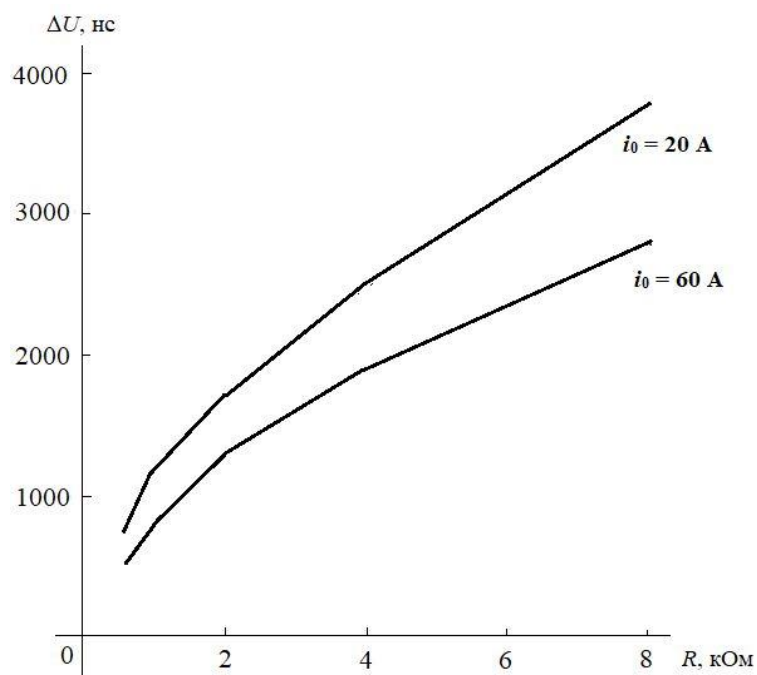


Рис. 3.25. Графіки залежності ширини імпульсу напруги від опору навантаження при $L = 100$ мкГн, $E = 1$ кВ.

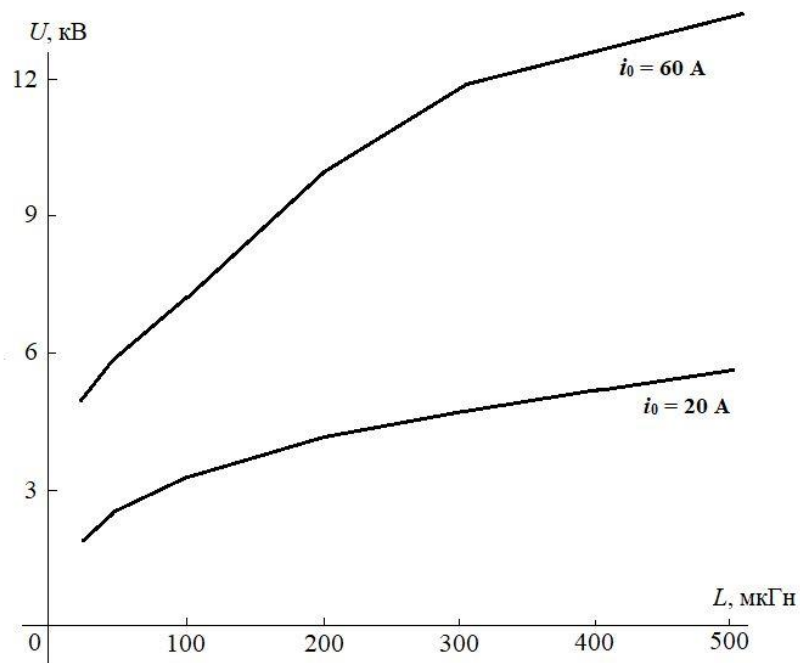


Рис. 3.26. Графіки залежності амплітуди імпульсу напруги на навантаженні від індуктивності ІТЕ при $R = 1$ кОм, $E = 1$ кВ.

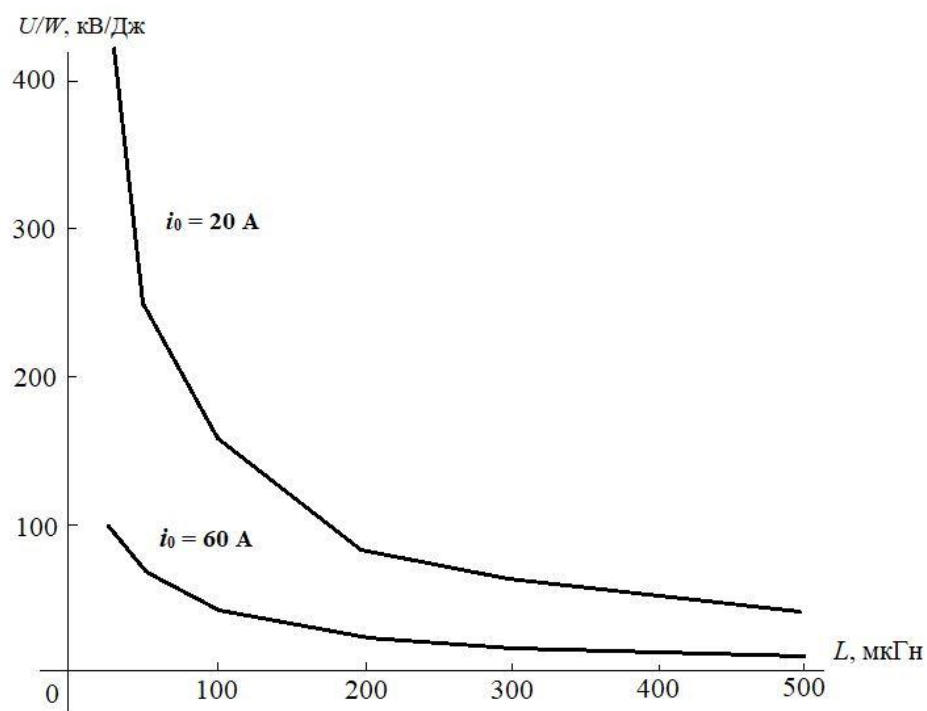


Рис. 3.27. Графіки залежності ефективності генерації імпульсу напруги на навантаженні від індуктивності ІНЕ при $R = 1$ кОм, $E = 1$ кВ.

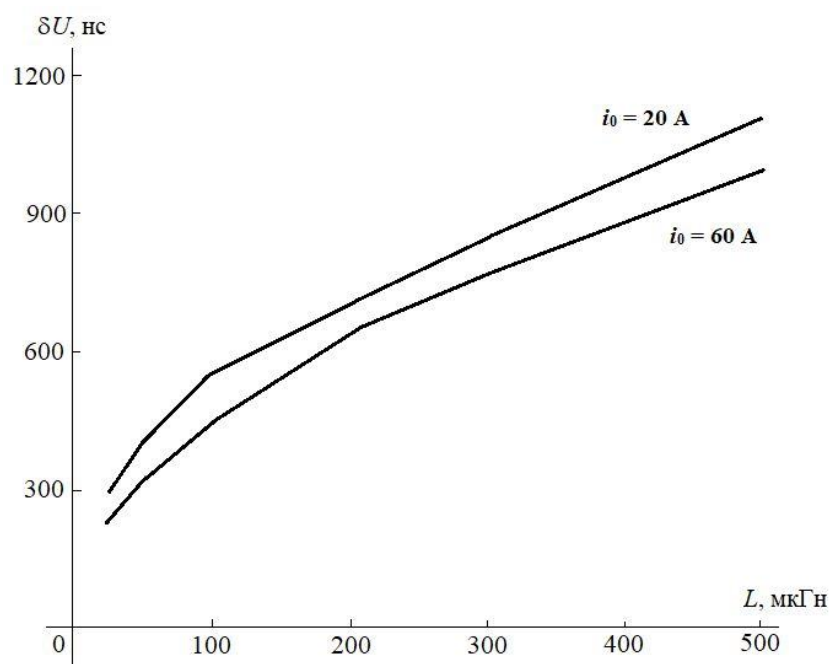


Рис 3.28. Графіки залежності тривалості фронту імпульсу напруги на навантаженні від індуктивності ІНЕ при $R = 1$ кОм, $E = 1$ кВ.

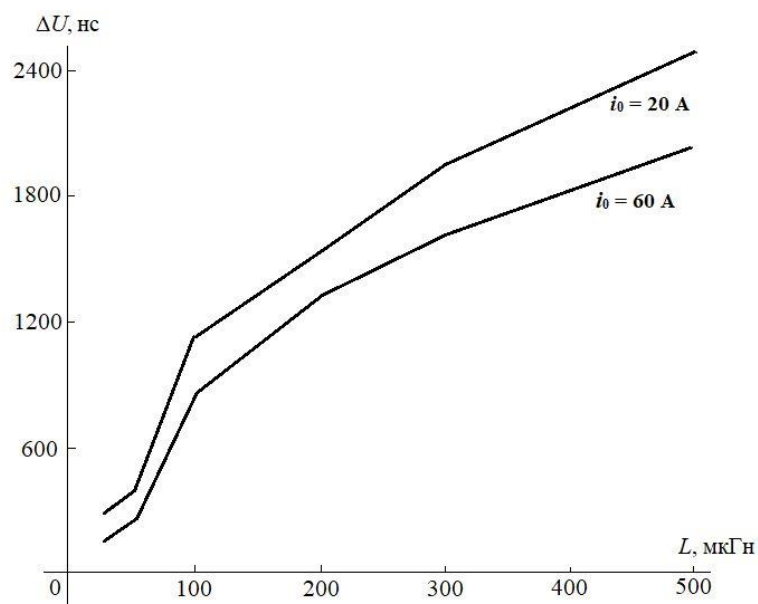


Рис. 3.29. Графіки залежності ширини імпульсу напруги на навантаженні від індуктивності ІНЕ при $R = 1$ кОм, $E = 1$ кВ.

Результати розрахунків свідчать про те, що при даних параметрах схема генерує мікросекундні імпульси з амплітудою на багато разів більше напруги джерела живлення E . Енергетична ефективність генерації віще при малих R і L .

4. РОЗРОБКА ДВОІМПУЛЬСНОЇ СХЕМИ КЕРУВАННЯ ДЛЯ ТАСІТРОННОГО ГЕНЕРАТОРУ

У даній роботі був розроблений пристрій для запуску тасітрона, виконаний з використанням транзисторів, у якості основних комутаційних приладів. Основною перевагою транзисторної схеми є мала амплітуда входних імпульсів, що не перевищує 5 В, та висока гнучкість зміни параметрів вихідних імпульсів. Застосування в схемі імпульсних трансформаторів дозволило зробити гальванічну розв'язку між високовольтними ланцюгами живлення тасітрона і ланцюгами схеми керування, що спрощує роботу зі схемою.

Пристрій запуску формує імпульси, що модулюють напругу до 1 кВ, тривалістю від одиниці до десятків мікросекунд при тривалості перепадів 0.5-2 мкс. Принцип дії пристрою керування пояснює спрощена схема на рис. 4.1.

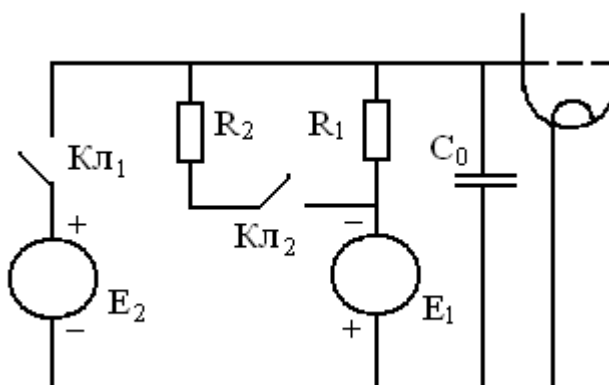


Рис.4.1. Спрощена схема пристрою для керування тасітроном

Принципова схема модулятора представлена на рис. 4.2. На транзисторі T_1 побудований підсилювач-обмежувач входних імпульсів. Конденсатори C_1 , C_3 , C_4 – форсуючі, за допомогою яких прискорюється формування перепадів сигналів. Ланцюги D_2 , R_5 і D_3 , R_7 придушують паразитні коливання. Резистори R_9 і R_{10} на рис. 4.2. відповідають R_1 і R_2 на рис. 4.1, а транзистори T_3 і T_4 відповідають ключам $KЛ1$ і $KЛ2$.

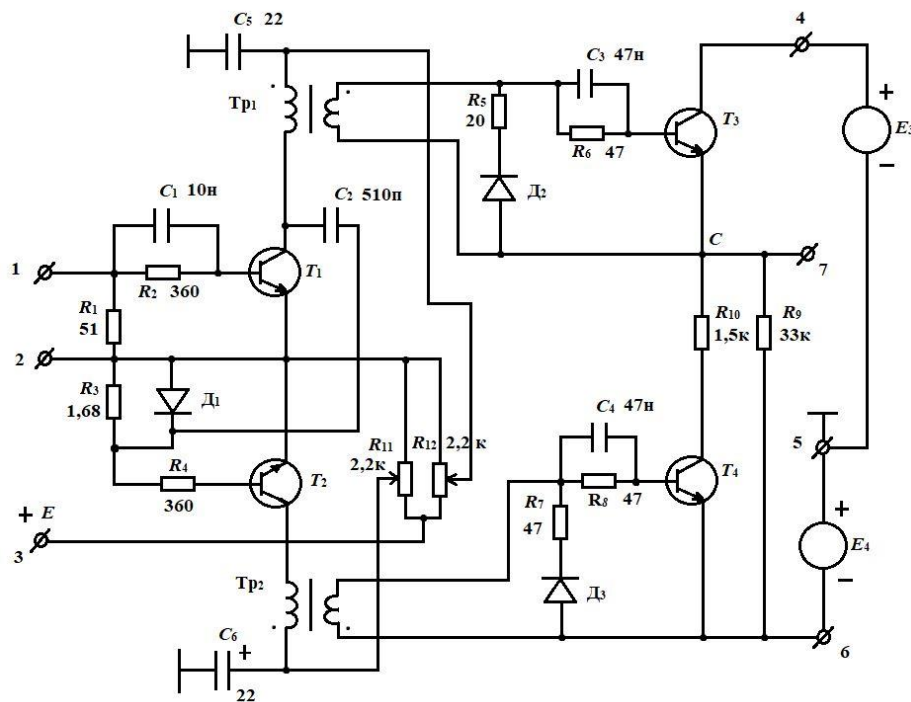


Рис. 4.2. Двоїмпульсна схема керування для тасітронного генератора

На T_2 побудована схема формування сигналу для допоміжного ключа T_4 . Для створення короткого імпульсу, що виникає в момент закінчення імпульсу U_{BX} , використовується ланцюг C_2, R_3 , що диференціює сигнал. Діод D_1 відрізає негативний імпульс, формований ланцюгом, що диференціює.

Резистори R_{11} і R_{12} використовуються для настроювання, для одержання мінімальних необхідних амплітуд імпульсів, що керують транзисторами T_4 і T_3 . Ціль настроювання – зменшення часу протікання наскрізного струму.

Трансформатори намотані на ферритових кільцях М2000НМ-А 28х16х9. Обмотки максимально рознесені. Первинні – по 30 витків ПЭЛШО 0,12 (внавал, довжина намотування по внутрішній окружності 10 мм.), вторинні – по 6 витків (виток до витка). Ізоляція між обмотками – у розрахунку на потенціал катода тасітрону стосовно загального проводу.

Напруги живлення : $E = 10$ В; $E_4 \leq 900$ В; $E_3 \leq 100$ В. Точки приєднання навантаження відповідно С і К.

Транзистор T_3 працює в ключовому режимі. Для упевненого відмикання транзистора повинна виконуватися умова $U_{be} > U_0 \approx 0,7$ В, при цьому струм, який протікає через транзистор, буде визначатися опором R_9 . Максимальний

колекторний струм транзистора КТ828Б $I_{k.max} = 5$ мА. Виходячи з цього виберемо опір R_9 .

$$I_K = \frac{E_4 + E_3}{R_9} < 5 \text{ Ом.} \quad (4.1)$$

Обмежимося колекторним струмом у 3 мА, тоді

$$R_9 = \frac{1000}{3 \cdot 10^{-3}} \approx 33 \text{ Ом.} \quad (4.2)$$

Умовою упевненого запирання ключа є: $U_{имп} + I_{k0max} \times R_6 \leq U_0 = 0,7$ В. З цього рівняння знайдемо R_6 ($U_{имп}$ приймемо рівним 0 В).

$$R_6 = \frac{U_0}{I_{k0max}} = \frac{0,7}{1,4 \cdot 10^{-3}} \approx 50 \text{ Ом.} \quad (4.3)$$

Вибір опору R_{10} – виходячи з розуміння, що час перезаряджу ємності $\tau \approx C_0 R_{10}$ по можливості повинен бути якнайменшим. Вибираємо $\tau = 0,3$ мкс, паразитна ємність $C_0 = 20$ пФ. Тоді

$$R_{10} = \frac{0,3 \cdot 10^{-6}}{20 \cdot 10^{-12}} = 1,5 \text{ кОм.} \quad (4.4)$$

Опір R_8 розраховується виходячи з тих же умов, що і для транзистора T_3 , і буде дорівнювати R_6 .

Трансформатори Tr_1 , Tr_2 розраховуються виходячи з обраних колекторних напруг для транзисторів T_1 , T_2 , ($E_k = 10$ В), і напруги у вторинних обмотках трансформаторів, що є вимикаючими для транзисторів T_3 , T_4 . Напруги вимикання приймаємо рівним $U_n = 2$ В, тоді коефіцієнт трансформації дорівнює:

$$q = \frac{E_k}{U_i} = \frac{10}{2} = 5. \quad (4.5)$$

Звідси по формулі $L_m \geq \frac{E_k t_k}{I_{k.max} - I_{k.s.}}$ знаходимо індуктивність намагнічування (t_k – тривалість імпульсу 10 мкс). $I_{k.max}$ – гранично припустимий колекторний струм для T_3 , T_4 , якій дорівнює 30 мА. $I_{k.s.}$ – струм насичення транзистора знаходимо по формулі

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|----------------------|-----|
| | | | | | ДП. ДЕ62. 01. 000 ПЗ | Арк |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 45 |

$$I_{k.s.} \approx \frac{E_k}{q^2 R_l}. \quad (4.6)$$

де R_l опір навантаження трансформаторів приймемо рівним 50 Ом. Тоді

$$I_{k.s.} \approx \frac{E_k}{q^2 R_l} = \frac{10}{5^2 \cdot 50} \approx 8 \text{ мА}. \quad (4.7)$$

$$L_m \geq \frac{E_k t_k}{I_{k.max} - I_{k.s.}} = \frac{10 \cdot 10 \cdot 10^{-6}}{30 \cdot 10^{-3} - 8 \cdot 10^{-3}} = 4,5 \text{ мГн}. \quad (4.8)$$

Виходячи з розрахованих коефіцієнта трансформації й індуктивності намагнічування вибираємо трансформатор.

Розрахунок опорів R_2 , R_4 робимо, виходячи з умови упевненого запирання транзисторів T_1 , T_2 .

$$R_2 = \frac{U_0}{I_{k.max}} = \frac{0.7}{2 \cdot 10^{-3}} = 350 \text{ Ом}. \quad (4.9)$$

$R_2 = R_4$ тому що транзистори T_1 , T_2 однакові.

ВИСНОВКИ

Розглянуто особливості генерації високої напруги для різних застосувань з використанням індуктивного накопичувача енергії та таситрону як газоразрядного приладу-комутатора, що періодично підключає індуктивний накопичувач до джерела струму накачування. Висока напруга генерується за рахунок ефекту самоіндукції при відключенні індукційного накопичувача від джерела живлення. При цьому можна виключити використання в схемі генератора високовольтного трансформатора. Величина напруги, що генерується може становити десятки кіловольт. Вихідна потужність генератора на таситроні може досягати десятків кіловат.

Застосування тасітрону спрощує електричну схему генератора, так як один такий комутатор може замінити кілька напівпровідникових приладів, що включаються послідовно. Також спрощується схема, підвищується енергетична ефективність і знижуються маса і габарити генератора в порівнянні з генераторами на електровакуумних комутаторах (електронних лампах). Розглянуто особливості роботи тасітронів як ключового газорозрядного приладу та типові характеристики. Розглянуто особливості керування тасітронами і показано, що двохімпульсна схема є оптимальною для використання.

Розглянуто питання побудови тасітронного генератора високої напруги, наведені формули для розрахунків.

Виконано численне моделювання динаміки генерації імпульсів на активному навантаженні при різних значеннях параметрів схеми генератору.

Результати розрахунків свідчать про те, що при даних параметрах вибрана схема генерує мікросекундні імпульси з амплітудою на багато разів більше напруги джерела живлення E . Енергетична ефективність генерації вище при малих R і L . Схему на тасітроні можна використовувати для генерації як високовольтних імпульсів, так і слабопульсуючої напруги при введенні в схему додаткового накопичувального (фільтруючого) конденсатора і

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|----------------------|------|
| | | | | | ДП. ДЕ62. 01. 000 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 47 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

розділового (блокуючого) діода, в якості якого доцільно використовувати швидкодіючий імпульсний газотрон з холодним катодом.

В останньому випадку запропоновано використовувати комбінований газорозрядний прилад-комутатор, що складається з тасітронних і газотронних частин із загальним катодним електродам в одній спільній герметичній оболонці, що спростить і здешевить схему генератора високої напруги.

Планується оформити заявку на отримання патенту на нову гібридну конструкцію ключового приладу тасітронного типу.

По матеріалам дипломної роботи подана стаття в науковий журнал (Східно-Європейський науковий журнал, Польща).

| | | | | | | |
|-------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|-----------------------------|-----|
| | | | | | <i>ДП. ДЕ62. 01. 000 ПЗ</i> | Арк |
| | | | | | | 48 |
| <i>Змн.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> | | |

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Foundations of Pulsed Power Technology / J. Lehr, P. Ron (eds.). – IEEE Press-Wiley, 2017.
2. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. – М.: Наука; 2004.
3. Akiyama H., Sakugawa T., Namihira T. Industrial Applications of Pulsed Power Technology // IEEE. DEI. – 2007. – V. 14. – No. 5. – P. 1051-1064.
4. Соковнин С. Ю. Мощная импульсная техника. – Екатеринбург: УГТУ. УПИ, 2008.
5. Пичугина М.Т. Мощная импульсная энергетика. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008.
6. Amoussou R., Sasaki M., Shigeishi M. An Application of Pulsed Power Technology and Subcritical Water to the Recycling of Asphalt Concrete // Procedia Eng. – 2016 – V. 143. – P. 1-9.
7. Bulychev S. V., Dubinov A. E., L'vov I. L. Autonomous portable pulsed-periodical generator of high-power radiofrequency-pulses based on gas discharge with hollow cathode // Rev. Sci. Instrum. – 2016. – V. 87. No. 5. – P. 054707 (1-6).
6. Bioelectrics / H. Akiyama, R. Heller (eds.). —Springer Japan, 2017
7. Олейник В.П. Терапевтические аппараты и системы: Учебное пособие. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т “Харьк. авиац. ин-т”; 2002.
8. Пилинский В. В. Источники вторичного электропитания с бестрансформаторным входом для электронной аппаратуры: учебное пособие. – Киев: КПИ; 1985.
9. Семенов Б.Ю. Силовая электроника для любителей и профессионалов. – М.: СОЛОН-Р; 2001.
10. Полуянович Н.К. Силовая электроника. Учебное пособие. – Таганрог: Таганрогский гос. радиотехн. ун-т, 2005.
11. Браун М. Источники питания. Расчёт и конструирование. К.: МК-Пресс, 2005.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|-----|
| | | | | | <i>ДП. ДЕ62. 01. 000 ПЗ</i> | Арк |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 49 |

12. Гейтенко Е.Н. Источники вторичного электропитания. Схемотехника и расчет: учебное пособие. – М.: СОЛОН-ПРЕСС; 2008.
13. Рама Р.С. Основы силовой электроники. – М. Техносфера. 2006.
14. Сукер К. Силовая электроника. Руководство разработчика. М.: Додэка-XXI, 2008.
15. Бочков В.Д., Верещагин Н.М., Горюнов Ф.Г. и др. Индуктивные накопители энергии, использующие газоразрядные приборы с полным управлением и их применение // Оптика атмосферы и океана. **1996**. Т.1. №2. С.231-237.
16. Воронин П.А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применения. – М.: Изд. дом Додэка XXI; 2001.
17. Erickson R.W., Maksimovic D. Fundamentals of Power Electronics. – Springer, 2001.
18. Williams B.W. Principles and Elements of Power Electronics. Devices, Drivers, Applications, and Passive Components. – Glasgow: B.W.W., 2006.
19. Baliga B.J. Fundamentals of Power Semiconductor Devices. – Springer, 2008.
20. Baliga B.J. Advanced High Voltage Power Device Concepts. – Springer, 2011.
21. Gusev A. I., Pedos M. S., Rukin S. N., Timoshenkov S. P. et al. A 6 GW nanosecond solid-state generator based on semiconductor opening switch // Rev. Sci. Instrum. – 2015. – V. 86. – P. 114706 (1-8).
22. Rukin S.N. Pulsed power technology based on semiconductor opening switches: A review // Rev. Sci. Instrum. – 2020. – V. 91. – No. 1. – P. 011501 (1-46).
23. Бочков В.Д., Королев Ю.Д. Импульсные газоразрядные коммутирующие приборы // Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Вводный том. М.: Наука; 2000. Кн.IV. С. 446-459.
24. Каганов И. Л. Ионные приборы. – М.: Энергия, 1972.
25. Фогельсон Т. Б., Бреусова Л. Н., Вагин Л. Н. Импульсные водородные тиратроны. – М.: Сов. радио, 1974.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|-----|
| | | | | | <i>ДП. ДЕ62. 01. 000 ПЗ</i> | Арк |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 50 |

ЛІСТИНГ ПРОГРАМИ

```
Sub Calc()  
'параметри для прикладу розрахунку  
L = 0.0001  
E = 1000  
a = 500  
b = 5000000000000#  
c = 1000  
d = 5000000000#  
i0 = 20  
'-----  
t = 1# / 1000000# 'часовий проміжок  
N = 500 'число кроків за часом  
dt = t / N 'розмір кроку  
'-----  
'di - дельта i  
'dt - дельта t  
i = i0  
t = 0  
Sheets.Add 'додаємо новий лист  
'Пишемо заголовок  
Cells(1, 1).Value = "t"  
Cells(1, 2).Value = "i"  
Cells(1, 3).Value = "u"  
Cells(2, 1).Value = 0  
Cells(2, 2).Value = i0  
Cells(2, 3).Value = (a + b * t) / (c + d * t) * i  
Row = 3 'номер рядка, куди пишемо результат  
For J = 1 To N Step 1
```

$$di = (E - (a + b * t) / (c + d * t) * i) / L * dt$$

$$t = t + dt$$

$$i = i + di$$

$$u = (a + b * t) / (c + d * t) * i$$

$$\text{Cells}(\text{Row}, 1).\text{Value} = t$$

$$\text{Cells}(\text{Row}, 2).\text{Value} = i$$

$$\text{Cells}(\text{Row}, 3).\text{Value} = u$$

$$\text{Row} = \text{Row} + 1$$

Next J

ActiveSheet.Shapes.AddChart.Select

ActiveChart.ChartType = xlLine

ActiveChart.SetSourceData Source:=Range("\$B:\$B")

ActiveSheet.Shapes.AddChart.Select

ActiveChart.ChartType = xlLine

ActiveChart.SetSourceData Source:=Range("\$C:\$C")

End Sub

ДОДАТОК Б

| Познач. | Найменування | Кільк. | Примітки |
|---------|--------------------------------|--------|----------|
| | Резистори | | |
| R1 | ОМЛТ-51Ом±10% ОЖО.467.107.ТУ | 1 | |
| R2, R4 | ОМЛТ-360Ом±10% ОЖО.467.107.ТУ | 2 | |
| R3 | ОМЛТ-1,6кОм±10% ОЖО.467.107.ТУ | 1 | |
| R5 | ОМЛТ-20Ом±10% ОЖО.467.107.ТУ | 1 | |
| R6-R8 | ОМЛТ-470Ом±10% ОЖО.467.107.ТУ | 3 | |
| R9 | ОМЛТ-33кОм±10% ОЖО.467.107.ТУ | 1 | |
| R10 | ОМЛТ-1,5кОм±10% ОЖО.467.107.ТУ | 1 | |
| R11 | СПО-2-2,2кОм±20%ОЖО.452.105.ТУ | 1 | |
| R12 | СПО-2-2,2кОм±20%ОЖО.452.105.ТУ | 1 | |
| | | | |
| | Конденсатори | | |
| C1 | ДО10-7-10нФ±5% ОЖО.464.023-ТУ | 1 | |
| C2 | ДО10-7-510нФ±5% ОЖО.464.023-ТУ | 1 | |
| C3, C4 | ДО10-7-47нФ±5% ОЖО.464.023-ТУ | 2 | |
| C5, C6 | ДО50-3-22мкФ±5% ОЖО.547.058-ТУ | 2 | |
| | | | |
| | Діоди | | |
| VD1-VD3 | КД503А д.Р.3.362.076ТУ | | |
| | | | |
| | Транзистори | 3 | |
| VT1-VT2 | КТ325Б т.Р.6.376.086.ТУ | 2 | |
| VT3-VT4 | КТ828Б т.Р.6.356.086.ТУ | 2 | |
| | | | |
| | Трансформатори | | |
| Тр1-Тр2 | Тім 24В АТ.336.055.ТУ | 2 | |
| | | | |

| | | | | | | | | |
|----------|-----------------|----------|--------|------|---|--|--|--|
| | | | | | <i>ДП. ДЕ62. 01. 000ПЕ</i> | | | |
| | | | | | | | | |
| Ізм | Лис | № докум. | Підпис | Дата | Схема електрична принципова. Перелік елементів | | | |
| Розроб. | Воляр Б. М. | | | | | | | |
| Перевір. | Кузьмичев А. І. | | | | | | | |
| Реценз. | | | | | | | | |
| Н.контр. | Чадюк В. О. | | | | | | | |
| Затверд. | Ямненко Ю.С. | | | | КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФЕЛ, ЕПС, гр. ДЕ-62 | | | |

ДОДАТОК В

| Поз. | Найменування | Кільк. | Примітки |
|------|--------------------------|--------|----------|
| | | | |
| | Складальні одиниці | | |
| 1 | Анод | | |
| 2 | Сітка керувальна | | |
| 3 | Катод | | |
| 4 | Генератор водню | | |
| 5 | Резистор-компенсатор | | |
| 6 | Штенгель | | |
| | | | |
| | | | |
| | Деталі | | |
| 7 | Ковпачок | | |
| 8 | Контакт генератора водню | | |
| 9 | Кільце опорне | | |
| 10 | Диск керамічний | | |
| 11 | Контакт катода | | |
| 12 | Ізолятор сітки | | |
| 13 | Ізолятор анода | | |
| 14 | Кільце керамічне | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

ДП. ДЕ62. 01.000 ЕЗ

ДОДАТОК Г

Перш. викорис.

Довід. №

Підпис і дата

Інв. № дубл.

Зам. інв. №

Підпис і дата

Інв. № ориг.

ДП. ДЕ62. 01.000 ЕЗ

Схема електрична
принципова

Літ.

Маса

Масштаб

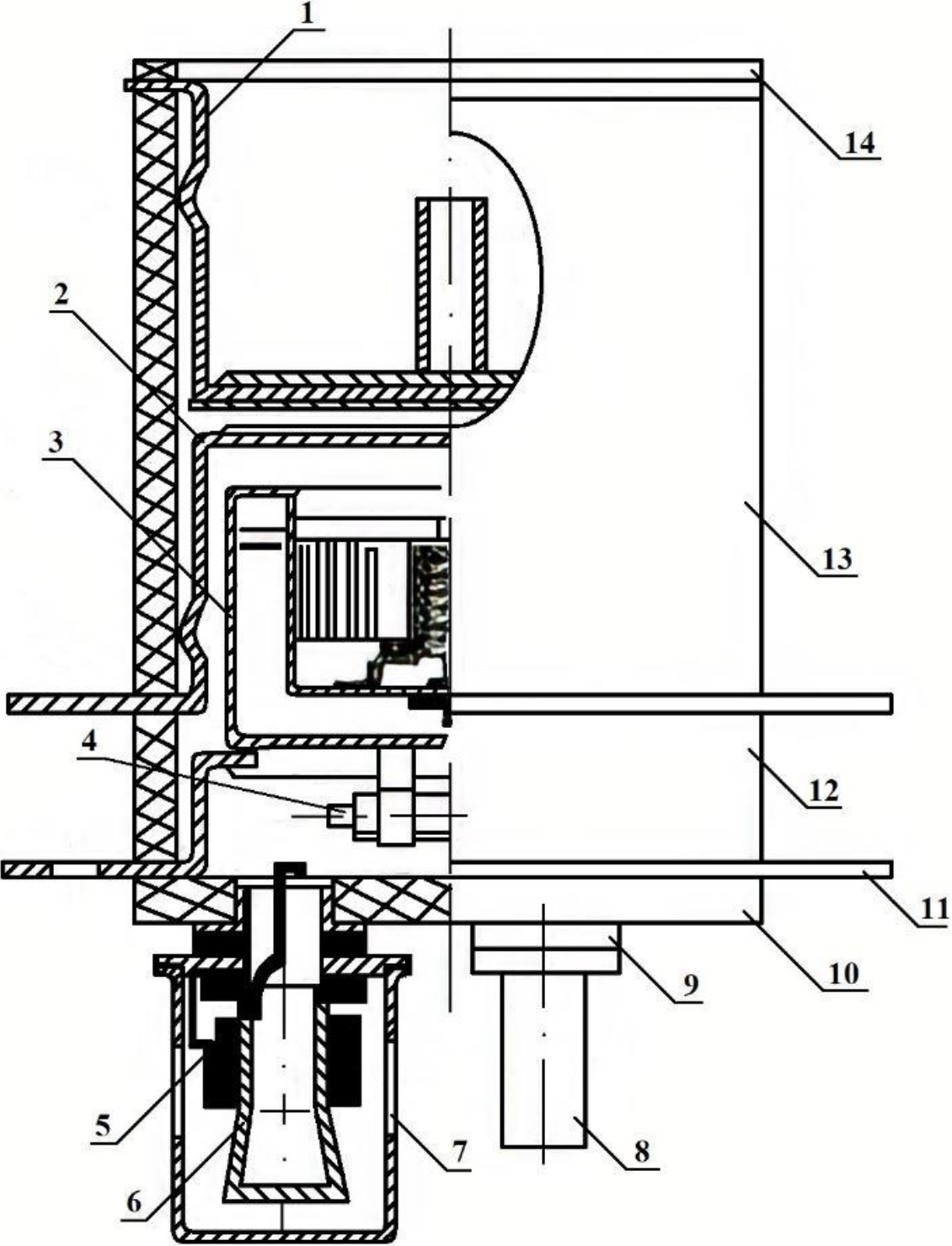
Арк.

1

Аркушів

1

КПІ ім. Ігоря Сікорського,
ФЕЛ, ЕПС, ДЕ-62 гр. ДЕ62

| | | | | | | | | | | | |
|----------------|--------------|---|-----------------|------------------------------------|--------|------|--|------|---------|-------|--|
| Перш. викорис. | Довід. № | ДП. ДЕ62. 01. 000 КС | | | | | ДОДАТОК Д | | | | |
| | |  | | | | | | | | | |
| Підпис і дата | Інв. № дубл. | Зам. інв. № | Підпис і дата | ДП. ДЕ62. 01.000 КС | | | | | | | |
| | | | | Конструкція тасітрона ТГУ1-27/7 | | | | | | | |
| Інв. № ориг. | | Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | Літ. | Маса | Масштаб | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | Розроб. | Воляр Б. М. | | | | | | 1 | 1 : 1 | |
| | | Перевір. | Кузьмичев А. І. | | | | | | | | |
| | | Т. Контр. | | | | | Арк. | 1 | Аркушів | 1 | |
| | | Н. Контр. | Чадюк В. О. | | | | КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФЕЛ, ЕПС, ДЕ-62 гр. ДЕ62 | | | | |
| | | Затверд. | Ямненко Ю. | | | | | | | | |

SUMMARY

Electronic generator with inductive energy storage for high-voltage technologies

This work consists of 2 drawing sheets, 50 pages of explanatory note, 4 sections, 40 pictures, 1 tables, 5 appendices.

The topic of the work is due to the fact that many electrophysical processes, including plasma, electrochemical and electrotechnological ones, as well as some medical procedures are based on the use of high voltage. The voltage can be constant, alternating or pulsed. Its value depends on the application and can range from a few to hundreds of kilovolts. There are various means of generating and obtaining high voltage. This paper considers the features of high voltage generation without step-up transformers, but with the use of inductive energy storage (IES). High voltage is generated due to the effect of self-induction when the induction coil is quickly disconnected from the power supply. The magnitude of the voltage can reach values far exceeding the voltage of the primary source for pumping the coil current, that is, the IES can perform the functions of a voltage transformer, but the load current will not be greater than the pumping current of the IES. As a rule, high-voltage generators based on IES are simpler than other schemes, so this approach is used in many transformerless power supply circuits. A feature of generators with IES is the need to use a switch device that can not only turn on the pumping current of IES, but also turn it off, and the faster is the better. In this case, the device in the off state must withstand high voltage without breakdown.

Today there are a number of electronic devices that can repeatedly in frequency mode to turn off the current in the presence of high voltage on the electrodes. Such devices include transistors, closing-opening (two-operation) thyristors, reversible dynistors, electrovacuum switches with electronic flow closure and some types of gas-discharge (plasma) switches. Transistors have

become the most widespread, mainly in systems of high-efficiency transformerless power supply of electronic equipment, but the value of the allowable voltage does not exceed a few kilovolts. This also applies to switching off thyristors. Reversible dynistors are high-voltage ones, but they operate in the nanosecond range. Electrovacuum switches (including grid electronic lamps) are very effective in terms of switching off speed and allowable voltage, but they are cumbersome and have large power losses for cathode heating and electron flow transportation through vacuum gaps during the conduction period. Gas discharge switches have lower losses during this period due to the compensation of the electronic space charge with a positive charge of plasma ions. They have less weight, size and cost. However, the interruption of the gas discharge in the presence of voltage on the electrodes is very problematic. As one know, the same problem occurs in thyristor-type devices, the processes in which are largely similar to the processes in gas-discharge switches.

Various approaches to controlled gas discharge shutdown have been proposed, one of the promising approaches is based on grid control, which is similar to grid control in electronic tubes. The network-controlled switch was called a tacitron. Modern tacitrons allow you to turn off the current up to 1 kA at voltages up to 25 kV and more. Their main purpose is to work together with capacitive energy storage devices, but it is interesting to use them to generate high voltage together with IES. Such use of tacitrons is in demand, but it has not been studied enough. Its development would expand the use of tacitrons, increase their industrial output, and develop new designs. The aim of this work is to consider the features of the generation of high voltage with tacitron-IES scheme.

The first section considers the principle of operation of tacitrons, their energy and time characteristics. It is noted that tacitron can be considered as a thyatron-type device having a special fine-grained structure of the grid. The fine structure of the structure means the small diameter of the holes in it for the passage of electrons to the anode. Under the operating conditions, typical of thyratrons: hydrogen pressure 20-80 Pa and current density through the hole $5-50 \text{ A/mm}^2$, the thickness of the

ionic layer near the grid l was small compared to the size of the holes in the grid $D = 3-4$ mm. This leads to shielding of the field of the control electrode and the loss of control by the grid. In tacitrons, due to the lower pressure of the working gas (1.5-30 Pa) and smaller mesh size $D < 0.5$ mm, already in the stage of conductivity l compared with D . When the negative potential is applied to the grid l increases, which leads to complete overlap of the hole with a layer of space charge of ions and locking of the electron current at the anode. In fact, the grid, which was previously under floating potential, begins to play the role of the cathode relative to the discharge in the starting chamber, and the cathode chamber (starting chamber) ceases to supply electron flow to the main gap. This leads to the quenching of the discharge in the main gap (anode-grid gap). The grid current required to turn off the tacitron can be 80-100% of the anode current. It is noted that increasing the locking rate of the electron current at the anode and the scattering of plasma in the device requires rapid recovery of the negative voltage on the grid at the time of quenching the discharge.

It is also noted that a two-pulse circuit is effective for tacitron control, one of the variants of which is discussed in this section. The essence of the circuit is to use one (positive) pulse to start the tacitron (i.e. to translate it into a state of conductivity), and the second to quench the discharge between the cathode and the anode (i.e. to lock the tacitron). The two-pulse control circuit has a number of advantages, in particular in the following. When current flows to the anode in the tacitron, the current to the grid is zero, and the grid is not subject to intense ion bombardment. The pulse length of the anode current in the load is easily regulated by changing the delay time of the quenching pulse. The control pulses have a short length, and with a large length of the anode current pulse they are not subject to strict requirements. In the voltage generators to which this work is devoted, anode current pulses are used to pump IES magnetic energy. This section also presents a typical design of a tacitron with a thermoelectronic cathode and hydrogen filling and presents the parameters and characteristics of industrial tacitrons with thermoelectronic and cold secondary emission cathodes.

In the second section of the work the analysis and selection of basic variants of construction of the circuit of the high voltage tacitron generator are carried out. From all variety of possible schemes of construction of the high-voltage tacitron generator two basic options are allocated. One is designed to generate a short-pulse voltage, and the other - a weakly pulsating almost constant voltage. In the first variant, the load is connected in parallel to the tacitron, and in the second variant, a capacitor energy storage is connected in parallel to the load, which together with the load is connected to the IES and tacitron through a blocking valve or diode. The section presents the timing diagram of the generator for both options. The formulas for calculations of the IES pumping stage are given.

For the first variant of the scheme, formulas are given for estimating the amplitude of the voltage pulse and the duration of the voltage drop across the load, i.e. the duration of the trailing edge of the voltage pulse on the load. To analyze the generation of high voltage on a load with a parallel capacitor, it is recommended to use the theory of booster converters DC-DC type, already developed for transistor circuits. But it is noted that it is necessary to improve the method of calculation of tacitron generators taking into account their actual characteristics.

In the schemes of the second option it is recommended to use as a blocking diode not only semiconductor valves (in practice it is a chain of a large number of series-connected discrete devices), but also high-speed high-voltage pulse discharge valves (pulse gas-filled rectifier diode/gastron). Such valves with cold cathodes do not require the introduction into the circuit of an additional incandescent transformer in the high-voltage version and the power consumption for heating the cathode.

The offer on creation of a new tacitron of a hybrid design for generation of high voltage on load with the parallel capacitor is developed. It is made in view of the fact that in the circuit of a generator with a parallel capacitor to the load the same-name electrodes of tacitron and gastron can have a common connection point and be under the same potential, and it can be used instead of two devices one

combined device of hybrid design with tacitron and gastron parts. Herein, these parts must have a common electrode for both parts. Such a common electrode for both parts may be the anode or cathode. The choice of design option is determined by the presence of a suitable industrial device and the requirements of the consumer of this equipment. For practical reasons, as the common electrode, it is advisable to choose a more complex electrode, and this is often the cathode. Options for constructing a generator circuit with a similar device for different polarities of the output voltage are shown.

The third section is devoted to the simulation of the first variant of the circuit with a load parallel to the tacitron to generate a pulse voltage after its locking. To simulate the real behavior of the tacitron at this stage, its electrical properties were represented by an active resistor with a linearly increasing resistance over time. The developed mathematical model is based on Kirchhoff's second law for an electrical circuit from a power supply, IES, tacitron and load in the form of an active resistor. A nonlinear first-order differential equation with a variable coefficient was formed and a program was compiled into the EXCELL environment for numerous calculations of dynamic processes in the generator circuit.

The dependences of the amplitude of voltage pulses on the load U , their time characteristics and efficiency coefficients of U/W generation, where W is the pumping energy of IES, from the values of load resistance R in the range of 0.5-5 kOhm and the inductance L of IES in the range of 25-500 μ H at the supply voltage 1 kV. and different values of current i_0 for pumping IES. The figures show typical calculation results.

The results of the calculations show that at these parameters the circuit generates microsecond pulses with an amplitude many times greater than the voltage of the power supply E . The energy efficiency of the generation is higher at low R and L .

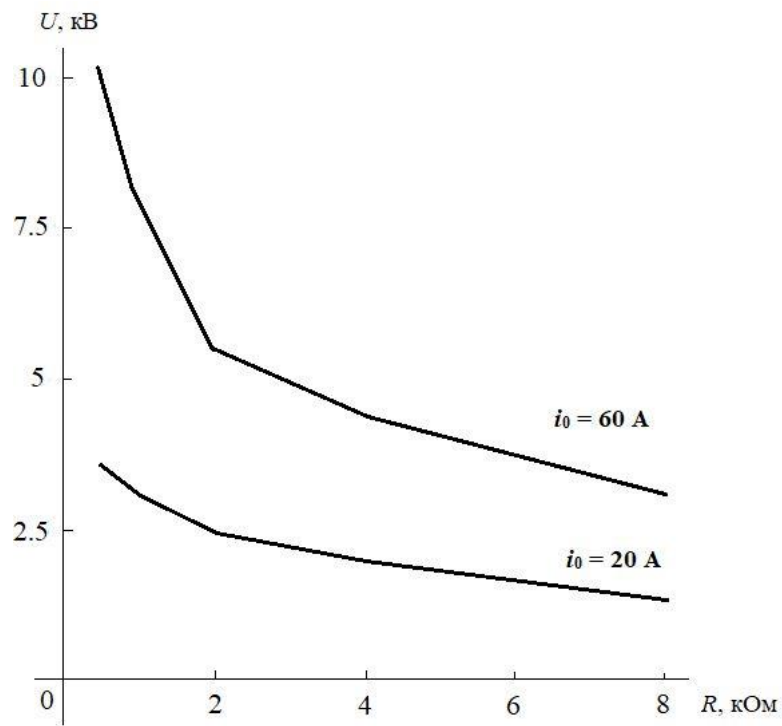


Fig.1. Graphs of the dependence of the amplitude of the voltage pulse on the load on its resistance at $L = 100 \mu\text{H}$, $E = 1 \text{ kV}$.

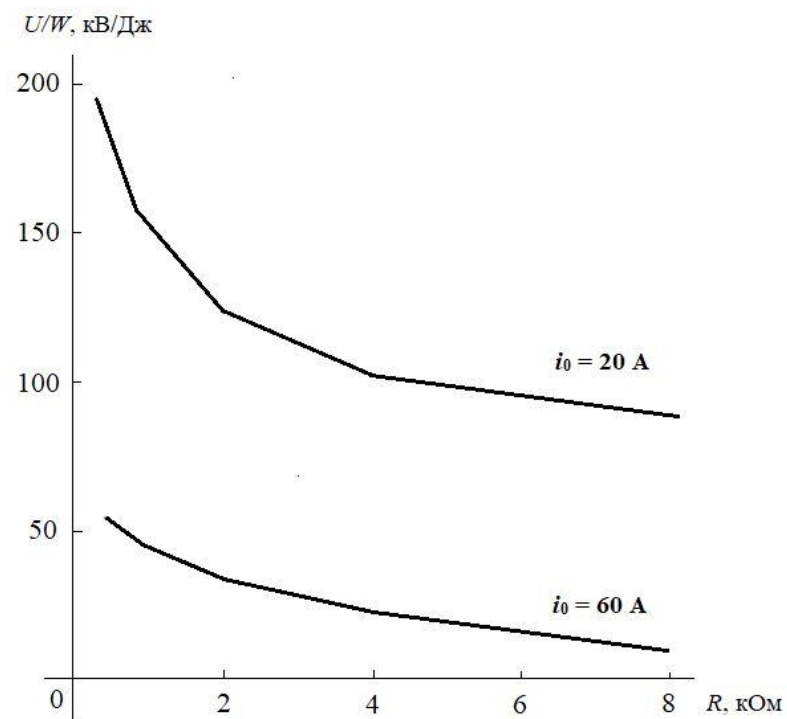


Fig.2. Graphs of the dependence of the efficiency of voltage pulse generation on the load resistance at $L = 100 \mu\text{H}$, $E = 1 \text{ kV}$.

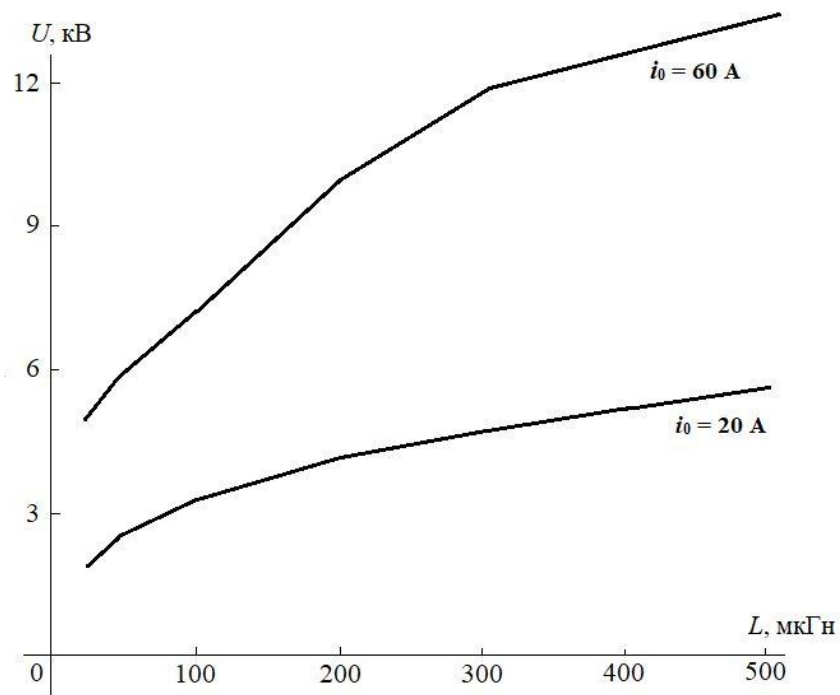


Fig.3. Graphs of the dependence of the amplitude of the voltage pulse on the load on the inductance of IES at $R = 1$ kOhm, $E = 1$ kV.

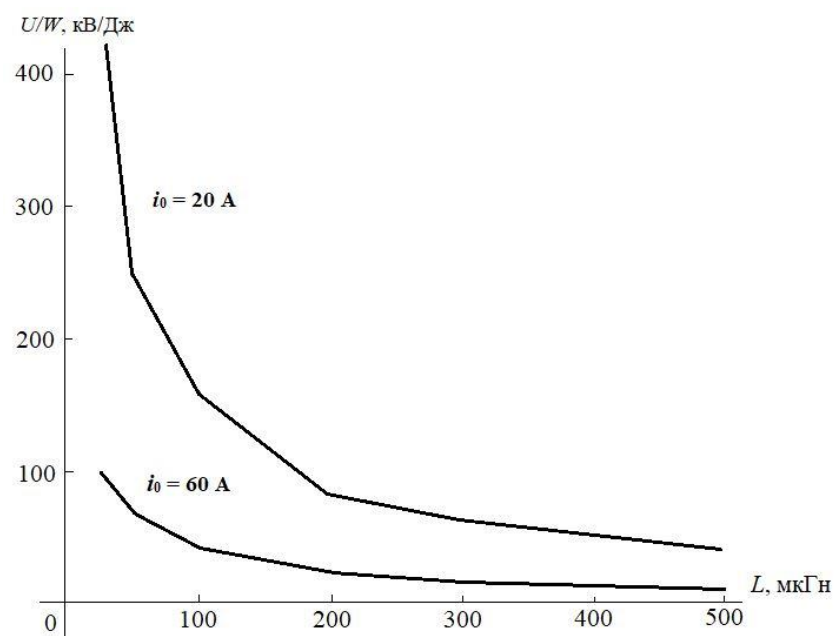


Fig.4. Graphs of the dependence of the efficiency of voltage pulse generation on the load on the inductance of IES at $R = 1$ kOhm, $E = 1$ kV

The fourth section is devoted to the description of the developed circuit device for starting tacitron, made using transistors as the main switching devices. The use of

pulse transformers in the circuit allowed to make a galvanic isolation between the high-voltage supply circuits of the tacitron and low-voltage circuits of the control circuit, which simplifies the organization of work with external control devices for high-voltage equipment. The device uses a two-channel principle of tacitron control with the supply of boosting pulses to the grid at the stage of quenching the discharge between the cathode and anode. These pulses are generated on the trailing edge of the primary pulses.

The starting device generates pulses that modulate voltage up to 1 kV, lasting from one to tens of microseconds with a duration of 0.5-2 μ s and is able to work with known industrial tacitrons.

Thus, in this paper we consider the construction of an electronic high voltage generator, which is used as an electronic switch gas discharge device the tacitron.

The basic schemes of the generator and formulas for calculations of its characteristics are resulted. Numerous simulations of the dynamics of pulse generation on the active load at different values of the parameters of the generator circuit are performed. The results of calculations indicate that at these parameters the selected circuit generates microsecond pulses with an amplitude many times greater than the voltage of the power supply E . Energy efficiency of generation is higher at low R and L . The possibility of practical implementation of electronic voltage generator up to 10 kV with 1-2 μ s pulses on a load with a resistance of 1-10 kOhm is approved.

The circuit on the tacitron can be used to generate both high-voltage pulses and low-pulsing voltage. The second case is with introducing into the circuit an additional storage (filter) capacitor and a blocking diode, as which it is advisable to use a high-speed pulse gas-filled rectifier diode (gastron) with a cold cathode.

In the latter case, it is proposed to use a combined gas-discharge device-switch consisting of tacitron and gas-filled rectifier diode parts with a common cathode electrode in one common sealed envelope, which will simplify and reduce the cost of the high-voltage generator circuit.

Keywords: high voltage, pulse voltage, tacitron, inductive energy storage, pulse gas-filled rectifier diode